

DIE ABHÄNGIGKEIT DER
AKKOMMODATIONSENTFERNUNG
VON DER FARBE

Thomas Steck

*Dr. Steck
München
1905*

Aus dem Institut für Arbeitsphysiologie der Technischen
Universität München

Direktor: o. Prof. Dr. med. W. Müller-Limmroth

DIE ABHÄNGIGKEIT DER AKKOMMODATIONSENTFERNUNG
VON DER FARBE

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung der Doktorwürde in der gesamten Medizin
an der Ludwig-Maximilians-Universität zu München

vorgelegt von

Thomas Steck

aus

Freising

München 1985

Mit Genehmigung des Fachbereichs Medizin der Universität

München

Dekan: Prof. Dr. W. Spann

Berichterstatter: Prof. Dr. K. Thureau

Tag der mündlichen Prüfung: 19. Dezember 1985

Meinen Eltern

gewidmet

Inhaltsverzeichnis

1. <u>Zusammenfassung</u>	1
2. <u>Einleitung</u>	3
2.1 Die Akkommodation	3
2.1.1 Der Regelkreis des Akkommodationsvorganges	4
2.1.2 Akkommodationsruhelage	5
2.1.3 Chromatische Aberration	6
2.2 Farbreiz und Farbempfindung	9
2.2.1 Normfarbtafel	9
2.2.2 Farbmatrik	11
2.2.3 Farbsehen	14
2.3 Fragestellung	16
3. <u>Methodik</u>	19
3.1 Versuchsaufbau	19
3.1.1 Projektion	20
3.1.2 Meßgeräte	21
3.1.3 Versuchsperson	24
3.2 Versuchsbedingungen	25
3.3 Versuchsdurchführung	26
3.4 Auswertung	29
4. <u>Ergebnisse</u>	30
4.1 Akkommodationsmessungen an Spektralfarben	30
4.2 Versuch I: Akkommodationsmessungen auf den 11 Farbgeraden	32

4.2.1 Farbgerade außerhalb des "Purpurdreiecks"	32
4.2.2 Farbgerade durch den Unbuntpunkt	33
4.2.3 Farbgerade durch das "Purpurdreieck"	33
4.3 Akkommodationsschwankungen bei Mischfarben	33
4.3.1 Vergleich der Schwankungsparameter Spektralfarben - Mischfarben	36
4.3.2 Schwankungsgipfel	37
4.4 Versuch II	37
4.5 Linien gleicher Refraktion in der Farbtafel	39
4.6 Subjektives Empfinden der Purpurfarben	41
5. <u>Diskussion</u>	43
5.1 Deutung von Versuch I und II	43
5.2 Akkommodation bei bedingt-gleichen Farben	45
5.3 Betrachtung der Isorefraktionslinien der Farb- tafel	47
5.4 Betrachtung der Akkommodationsschwankungen	49
5.5 Schlußfolgerungen	50
5.5.1 Folgerungen für den Bildschirmarbeitsplatz	50
5.5.2 Abschließende Betrachtung des Akkommoda- tions-Vergenz-Regelkreises	51
5.6 Fehlerbetrachtung	52
6. <u>Anhang</u>	54
7. <u>Literaturverzeichnis</u>	63

1. Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde versucht, im Anschluß an Akkommodationsmessungen an Spektralfarben systematische Erkenntnisse über das Akkommodationsverhalten bei bichromatischen Mischfarben zu gewinnen. Bei jedem von insgesamt 11 eingesetzten Spektralfarbenpaaren wurde für verschiedene Leuchtdichteverhältnisse der beiden Komponenten die Akkommodation bestimmt. Die Messungen wurden mit einem Infrarot-Optometer an einer Versuchsperson durchgeführt. Beim Zumischen steigender Anteile einer höheren Wellenlänge nimmt die Akkommodationsentfernung nicht linear, sondern in einem parabolischen oder sigmoiden Verlauf zu. Dieses wird erklärt durch das Bestreben, den akkommodativen Aufwand möglichst gering zu halten, und durch den Einfluß der Akkommodationsruhelage.

Die Fluktuationen der Akkommodation stiegen auf jeden Fall mit zunehmendem Sollwert an. Bei den Mischfarben waren sie signifikant ($p < 0,02$ bzw. $< 0,01$) höher als bei den zugehörigen Spektralfarben. Das simultane und isolierte Angebot zweier Wellenlängen scheint eine gewisse Irritation des Akkommodationsapparates hervorzurufen.

Bei Mischfarben, deren beide Komponenten im Spektrum entweder eng benachbart oder sehr weit voneinander entfernt sind, ist der Einfluß der Ruhelage besonders groß.

Überträgt man die Ergebnisse in die Normfarbtafel, so lassen sich in dieser Linien gleicher Refraktion einzeichnen. Diese Linien sind im basalen "Purpureck" deutlich zum roten Spektralende hin verschoben und verlaufen im übrigen "Farbdreieck" re-

lativ geradlinig. Diese Linien gleicher Refraktion gelten allerdings nur für Mischfarben, die auf die genannte Art und Weise erzeugt worden sind. Schließlich wurde die Akkommodationsentfernung auf Farben, die gleich aussehen, aber physikalisch nicht gleich sind, untersucht. Dazu wurde bei 8 Farbarten (Farborten der Farbtafel) ein Akkommodationsvergleich durchgeführt. Der Vergleich legt den Schluß nahe, daß auf solche bedingt-gleichen (metameren) Farben auch in gleicher Weise akkommodiert wird. Jedoch gilt auch dieses nur für den Bereich der bichromatischen Mischfarben.

2. Einleitung

2.1 Die Akkommodation

Als Akkommodation wird gemeinhin der Vorgang bezeichnet, einen Gegenstand auf der Netzhaut scharf abzubilden. Nach GULLSTRAND beträgt die Brechkraft aller brechenden Medien im Auge 58,6 dpt (Dioptrien) beim Blick in die Ferne; hiervon entfallen rund 15 dpt auf die Linse.

Mit der Einheit Dioptrie ($1 \text{ dpt} = 1 \text{ m}^{-1}$) benennt man in der Optik die Brechkraft von Linsen oder -systemen. Die Brechkraft wiederum ist definiert als Kehrwert der in m ausgedrückten Brennweite. Darüber hinaus wird das Zeichen "dpt" zum Benennen von Sehabständen herangezogen: statt "in 25 cm Abstand" kann man sagen "in 4 Dpt".

Die stärkste Brechung widerfährt den einfallenden Lichtstrahlen an der Hornhautvorderfläche. Vereinbarungsgemäß beträgt die Akkommodation beim Blick ins Unendliche 0 dpt.

Die in ihren äußeren Schichten elastische Linse ist durch die radiär verlaufenden Zonulafasern am zirkulär verlaufenden Akkommodationsmuskel, dem M. ciliaris, aufgehängt. Der M. ciliaris empfängt parasympathische, zu einem geringen Teil auch sympathische Nervenfasern aus dem Ggl. ciliare. Beim Blick auf einen näherliegenden Gegenstand kontrahiert sich der M. ciliaris (Akkommodationsbewegung), wodurch die Linse aufgrund ihrer elastischen Kraft eine mehr kugelige Form annimmt. Die Brechkraft erhöht sich dadurch. Der Bildpunkt des optischen Systems des Auges ist die Macula densa (Ort des schärfsten Sehens).

2.1.1 Der Regelkreis des Akkommodationsvorganges

Der Sollwert im Regelkreis der Akkommodation ist die optimale retinale Bildschärfe. Die Regelgröße ist die Linienbrechkraft und das Stellglied ist der M. ciliaris.

Das Akkommodationszentrum liegt am Boden der Rautengrube, zwischen den Kerngebieten der Nn. oculomotorii. Es empfängt Zuflüsse aus dem Vergenz-Reflexbogen und sorgt sodann für eine Fokussierung des Bildes. Unter "Vergenz" versteht man die Stellung der Augenachsen bei der Fixation. Sie kann ausgedrückt werden durch die Entfernung des Augenachsenschnittpunktes vom Auge oder durch den Winkel, den die Augenachsen miteinander bilden. Beim Anblicken eines Gegenstands in anderer Sehentfernung erfolgt eine "Vergenzbewegung", d. h. die Augenachsen verändern ihre Stellung zueinander (Kon- oder Divergenz). Die Akkommodationsbewegung ist durch neuronale Verschaltung an die Vergenzbewegung gekoppelt (18).

Der auslösende Reiz für die Vergenzbewegung wiederum ist die Tatsache, daß beim Wechsel der Sehentfernung die Bildpunkte nicht mehr auf korrespondierenden Netzhautpunkten liegen (Netzhautdisparität) (14).

Neben der Vergenz haben noch weitere Größen, wie z. B. Helligkeit und Kontrast des Sehobjekts, Einfluß auf den Regelkreis der Akkommodation (Einfluß- oder Störgrößen). Die statische Akkommodationslage ist außerdem abhängig von der Akkommodationsanforderung, die sich für farbige Sehobjekte mehr oder weniger von der Sehentfernung unterscheidet (11).

Die Reaktionszeit der Vergenzbewegung ist beträchtlich kürzer als die der Akkommodationsbewegung (34), was beweist, daß sie der Akkommodation im Normalfall vorausgeht (Vergenzakkommodation). Jedoch kann unter entsprechenden experimentellen Bedingungen auch das

Umgekehrte beobachtet werden (akkommodative Vergenz). Dennoch sollte der Einfluß sogenannter höherer Funktionen nicht übersehen werden. Laut CAMPBELL (4) läuft die Akkommodationsbewegung sicher nicht in der Weise ab wie etwa der Pupillen-Licht-Reflex. Wegen der Rolle der Großhirnrinde (als weitere Einflußgröße) erscheint es problematisch, von einem Akkommodations-"Reflex" zu sprechen (34).

2.1.2 Akkommodationsruhelage

Mißt man die statische Akkommodation (Akkommodationslage) ohne Akkommodationsreiz, z. B. beim Blick in den strukturlosen blauen Himmel oder in stockdunkler Nacht, so erhält man nach LEIBOWITZ & OWENS (24) Werte zwischen 0,4 und 2,3 dpt mit einem Mittelwert von 1,25 dpt. Es hat sich die Überzeugung durchgesetzt, dieses Verhalten mit der Akkommodationsruhelage zu erklären. Sie ist der Ausdruck eines Gleichgewichts im vegetativen Nervensystem, zu dem die Akkommodationslage bei Fehlen eines visuellen Reizes zurückkehrt.

Der Wert der Ruhelage weist eine große interindividuelle Streuung auf. In einer anderen Versuchsreihe von LEIBOWITZ & OWENS, über die ebenfalls in (24) berichtet wird, ergab sich eine Bandbreite des "dark focus" zwischen 0 und 4 dpt, mit einem Mittelwert von 1,71 dpt und einer Standardabweichung von 0,72 dpt.

Nach Meinung der beiden Autoren soll man die zu beobachtende Akkommodationslage (Akkommodationsentfernung) daher als einen Kompromiß zwischen der individuellen Ruhelage und der gegebenen Objektentfernung, d. h. der Akkommodationsanforderung, auffassen. Je dunkler und/oder je kontrastärmer das Sehobjekt ist,

je weniger es also als Akkommodationsreiz wirkt, um so mehr wird die Akkommodationslage die Tendenz haben, zur Ruhelage zurückzukehren und umgekehrt. In Abhängigkeit von der individuellen Ruhelage und der Intensität der Beleuchtung ist das normalsichtige (emmetrope) Auge für alle entfernt gelegenen Objekte zu kurzsichtig und für alle nahe gelegenen Objekte zu weitsichtig. Dieses ist selbst noch der Fall unter optimalen visuellen Bedingungen, d. h. uneingeschränktes beidäugiges Sehen einer hell erleuchteten, kontrastreichen Szene.

Im Regelkreis der Akkommodation stellt die Ruhelage somit einen ausgezeichneten Punkt dar: Hier fehlt die sonst bei Regelkreisen übliche Sollwertabweichung. Nur für ein Sehobjekt im Bereich der Ruhelage entspricht die Akkommodationsentfernung auch dem durch die Objektentfernung gegebenen Sollwert. Nach MILLODOT (25) sind die immer vorhandenen Schwankungen der Akkommodation im Bereich der Ruhelage am kleinsten und wachsen an mit zunehmender Entfernung von dieser.

Um den Einfluß der Ruhelage möglichst gering zu halten, muß man daher bei Messungen der Akkommodation besonderes Augenmerk auf die Beleuchtung und den Kontrast des Testzeichens richten.

2.1.3 Chromatische Aberration

Seit dem 18. Jahrhundert ist das Phänomen der chromatischen Aberration des Auges bekannt. Sie resultiert aus der Tatsache, daß im optischen Apparat des Auges verschiedene Wellenlängen verschieden stark gebrochen werden. MILLODOT & BOBIER (27) geben für die beiden Spektralenden zwischen 450 und 650 nm einen Brechkraftunterschied von 1,5 dpt an, während IVANOFF (15) zwischen 452,5 und 712 nm eine Differenz von 1,44 dpt

gemessen hat. BEDFORD & WYSZECKI (2) beobachteten einen Brechkraftunterschied von 2,49 dpt zwischen 389 und 700 nm (vgl. hierzu auch Abb. 1).

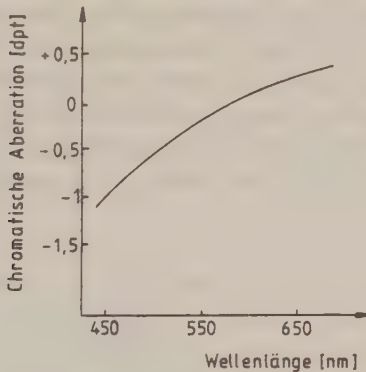


Abb. 1: Die chromatische Aberration des menschlichen Auges nach MILLODOT (26)

Diese Ergebnisse wurden mit sog. "subjektiven"¹ Meßverfahren gewonnen, aber später mit sog. "objektiven"² Verfahren bestätigt (8).

Wird das Auge mit weißem Licht (als Summe aller Spektralfarben) beleuchtet, so stellt es zentrale Wellenlängen scharf ein, die sich zwischen 555 und 589 nm befinden (27). Für rotes Licht (> 600 nm) ist es dann vergleichsweise weitsichtig und für blaues (< 490 nm) vergleichsweise kurzsichtig. Die eingestellte Wellen-

-
- 1) Beim "subjektiven" Verfahren wird die Brechkraft der Linse bestimmt, die nötig ist, um die zu schwache oder zu starke Brechung des Lichtes der betreffenden Wellenlänge zu kompensieren. Kriterium hierfür ist die von der Versuchsperson empfundene optimale Bildschärfe.
 - 2) "Objektive" Verfahren bedienen sich elektronischer Meßgeräte.

länge wiederum hängt von der Entfernung des Sehobjekts ab und verschiebt sich mit kürzerer Entfernung zu kürzeren Wellenlängen (29). Dadurch wird der akkommodative Aufwand möglichst gering gehalten.

Die Akkommodationsentfernung ist bei feststehender Objektentfernung durch die eingestellte Wellenlänge gegeben. Die Differenz zwischen Akkommodationsentfernung und -anforderung entspricht der Sollwertabweichung im Regelkreis der Akkommodation (Abb. 2).

Diese Sollwertabweichung ist von der Akkommodationsanforderung abhängig. Sie dient dazu, den Regelkreis in Gang zu halten.

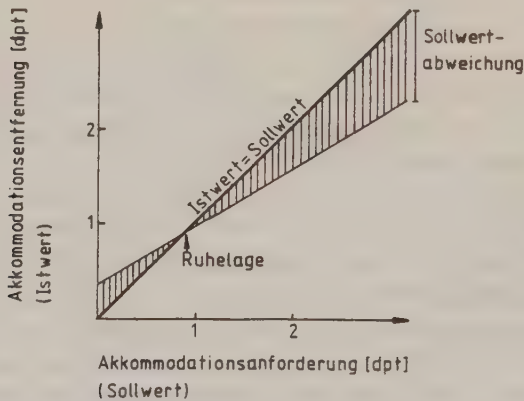


Abb. 2: Die Abhängigkeit der Akkommodationsentfernung von der Akkommodationsanforderung (Modell)

Die eingestellte Wellenlänge hängt außerdem von der Sättigung der Farbe, also dem Grad der Beimischung eines unbunten Anteils, ab (22). Sie wird ebenfalls beeinflusst vom zunehmenden Alter und dem Einsetzen der Presbyopie (26), weil dann die gesamte Akkommodationsbreite abnimmt.

2.2 Farbreiz und Farbempfindung

Jede Farbe hat ihre Ursache in einer elektromagnetischen Strahlung. Um den Eindruck "Farbe" entstehen zu lassen, ist es notwendig, daß funktionsfähige, in einem lebenden Organismus befindliche Sinneszellen durch die Strahlung gereizt werden. Die Farbempfindung wird nicht nur durch die physikalische Konfiguration des Farbreizes bestimmt, sondern auch durch seine zeitliche Anordnung, sein Umfeld, die Rezeptorqualitäten und die Art der zentralen Verarbeitung.

Farbreize, die als gleich empfunden werden, müssen physikalisch nicht gleich sein. Spektrales Gelb z. B. kann von einer Mischung aus spektralem Rot und Grün nicht unterschieden werden. Das Gleiche gilt für Weiß, welches aus zwei Komplementärfarben oder als Summe aller Spektralfarben erzeugt werden kann. Nach der DIN-Norm 5033 heißen zwei Farbreize mit unterschiedlichen Farbreizfunktionen (d. h. mit unterschiedlicher spektraler Zusammensetzung) "bedingt-gleich" oder "metamer", wenn sie zu gleichen Farbvalenzen führen, d. h. gleich aussehen.

2.2.1 Normfarbtafel

In der Normfarbtafel nach DIN 5033 sind die sinnesphysiologischen Resultate der additiven Farbmischung geometrisch dargestellt. Die Farbtafel hat die Form eines Dreiecks mit abgerundeter Spitze. Die äußere Begrenzung bildet die Reihe der reinen Spektralfarben; an der Basis befinden sich die Purpurtöne, die im normalen Spektrum nicht enthalten sind. Farbvalenzen, die sich nur durch die Helligkeit unterscheiden, besitzen die gleiche Farbart. Jeder Farbart wird in der Farbtafel ein Punkt (Farbort)

mit zwei Koordinaten x und y , den sog. "Normfarbwertanteilen", zugeordnet (31).

Die zur Bezeichnung einer Farbvalenz nötige dritte Dimension, die Helligkeit, wird in der Farbtafel nicht berücksichtigt, so daß nur Farbarten dargestellt sind. Als Maß für die Helligkeit verwendet man im allgemeinen die Leuchtdichte mit der SI-Einheit cd/m^2 . Trägt man senkrecht aus der Ebene des Farbdreiecks (Abb. 3) heraus den Hellbezugswert auf, der mit der Leuchtdichte über einen Weißstandard verknüpft ist, so entsteht ein bergähnlicher Farbkörper, der in seinem Inneren alle existierenden Farbvalenzen enthält.

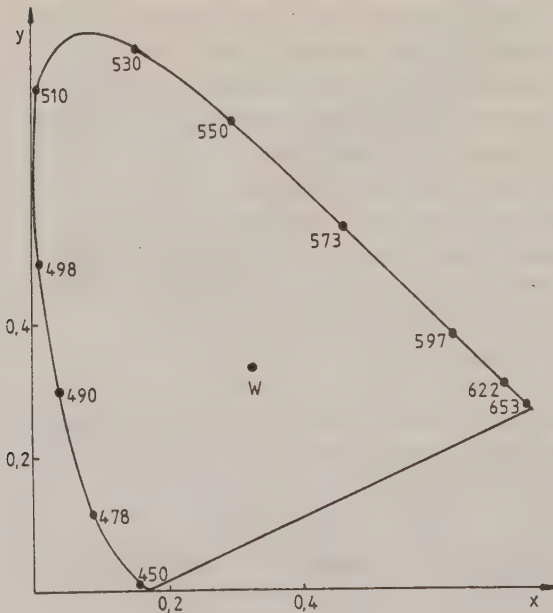


Abb. 3: Normfarbtabelle nach DIN 5033

Verbindet man (in der Farbtafel) die Farbborte zweier Spektralfarben miteinander, so liegen auf der Verbindungslinie die Orte aller Farbarten, welche durch eine additive Mischung aus den beiden Spektralfarben erzeugt werden können. Alle Verbindungslinien zwischen den Orten von Komplementärfarben gehen durch den Weißpunkt W ($x_w = y_w = 0,3333$).

Eine Linie zwischen W und dem Ort einer Spektralfarbe enthält nur Orte von Farbarten gleichen Bunttons, die sich aber in ihrer Sättigung unterscheiden.

"Farbe" ist eine dreidimensionale Größe, deren Dimensionen man beispielsweise als Farbton, Sättigung und Helligkeit bezeichnen könnte.

2.2.2 Farbmatrik

Im Farbenraum, der die Normfarbtafel enthält (Abb. 4), hat man sog. Primärvalenzen (Grundfarbvektoren) definiert (31). Jede Farbvalenz f läßt sich als eine Linearkombination aus diesen dreien darstellen: $f = X \cdot x + Y \cdot y + Z \cdot z$ (I). Dabei bezeichnen die sog. "Normfarbwerte" X, Y und Z den relativen Leuchtdichteanteil der betreffenden Primärvalenz an der jeweiligen Farbvalenz. Sie sind auf einfache Weise aus den Farbtafelkoordinaten x und y und aus dem erwähnten Hellbezugswert zu berechnen. Bei einer additiven Farbmischung sind sie einfach zu addieren.

Der Schwarzpunkt S stellt den Ursprungspunkt des Farbenraumes dar. Der Punkt des hellsten denkbaren Unbunts, der absolute Weißpunkt W_a , erhält die Koordinaten (100;100;100) zugeordnet. Zwischen S und W_a verläuft die Unbuntgerade, die unter anderem auch den Weißpunkt der Farbtafelebene W_f enthält. Der Ebene der Farbtafel wird die Gleichung $X + Y + Z = 1$

r und b bezeichnen dabei die jeweiligen Leuchtdichteanteile. Um den Ort M gemäß Gl. (II) zeichnerisch zu bestimmen, verlegt man den Ursprungspunkt der Farbvektoren aus S in den Unbuntpunktpunkt W_k der betreffenden Isolychnen-Ebene. Die dadurch entstehende Vektorgleichung ist eine Projektion von Gl. (II), aber sie bestimmt dieselben Punkte.

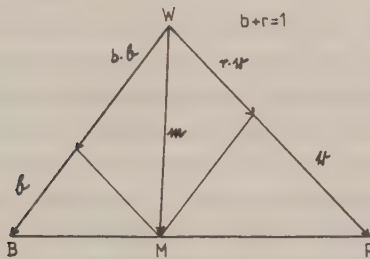


Abb. 5: Additive vektorielle Farbmischung in einer Ebene konstanter Leuchtdichte

Es läßt sich zeigen, daß in Abb. 5 das Streckenverhältnis $\overline{BM}/\overline{MR} = r/b$ sein muß.

Das Problem besteht nun darin, diese Farborte zur gebräuchlichen Darstellung aus einer Isolychnen-Ebene in die Farbtafelebene zu projizieren. Überträgt man die Figur des Farbdreiecks mittels Zentralprojektion aus der Farbtafelebene in eine Isolychne, so liegt dieses dort in verzerrter Form vor. Die Form, die das verzerrte Farbdreieck auf einer Isolychne hat, ist bisher noch nicht beschrieben. Man müßte sie aber kennen, wenn man die Endpunkte der Vektoren r und b festlegen und M bestimmen will. Es ist daher zu vertreten, wenn man die erwähnte Verzerrung bewußt vernachlässigt und so verfährt, als läge das Farbdreieck in einer Ebene

konstanter Leuchtdichte. Durch diese Vereinfachung kann die Vektorgleichung gemäß Abb. 5 nun direkt in der Ebene der Farbtafel angewendet werden. R und B stellen zwei Orte auf dem äußeren, das Farbdreieck begrenzenden Spektralfarbenzug dar, und Ort M liegt in seinem Inneren. M teilt die Strecke $\overline{BR}$ im Verhältnis r/b .

2.2.3 Farbensehen

In der menschlichen Netzhaut unterscheidet man zwei Klassen von Lichtrezeptoren, die Stäbchen und die Zapfen. Mit den Stäbchen wird in der Dämmerung und Nacht gesehen (skotopisches Sehen), mit den Zapfen während des Tages bei guten visuellen Bedingungen (photopisches Sehen). Letztere sind allein für das Farbensehen verantwortlich. Die Stäbchen verteilen sich über die gesamte Netzhaut mit Ausnahme der Macula und des "blinden Flecks" (Austrittsstelle des N. opticus); die Zapfen konzentrieren sich vorwiegend um die Macula. Unter den Zapfen lassen sich drei verschiedene Populationen unterscheiden, deren Sensibilitätsmaxima für farbiges Licht bei den Wellenlängen 445, 535 und 575 nm liegen (3,13) (vgl. hierzu Abb. 6).

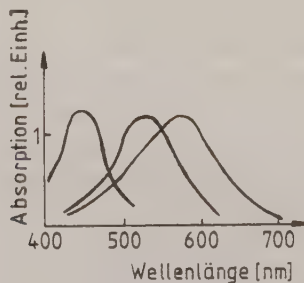


Abb. 6: Absorptions-Spektrum der drei Zapfen-Pigmente in der menschlichen Retina (nach (13))

Alle drei Zapfenarten sind jedoch innerhalb des gesamten sichtbaren Spektrums, wenn auch z. T. nur schwach, empfindlich. Bemerkenswert ist, daß sie auf den adäquaten Reiz hin nicht mit einer De-, sondern mit einer Hyperpolarisation reagieren, im Gegensatz zu allen anderen Rezeptorzellen. Die Erregung gelangt von den Stäbchen und Zapfen über die verschiedenen Populationen retinaler Zellen (bipolare, amakrine und Horizontalzellen) zu den Ganglienzellen des N. opticus (16). Über ein System von exzitatorischen und inhibitorischen Verschaltungen werden die einer jeden Farbe entsprechenden Erregungen an den nachgeschalteten Neuronen ausgelöst.

Die Horizontalzellen - welche die Stäbchen und Zapfen untereinander und mit den weiterleitenden Bipolarzellen verbinden - können z. B. depolarisierende (erregende) Zuflüsse von rot- und hyperpolarisierende (hemmende) Zuflüsse von grünempfindlichen Sinneszellen erhalten. Das Verhältnis der gleichzeitigen Stimulierung von rot- und grünempfindlichen Zapfen bestimmt also das Ausmaß der Erregung dieser Horizontalzelle. Einen entsprechenden Mechanismus gibt es für die Komplementärfarben Blau und Gelb (33). Damit läßt sich das Phänomen der Gegenfarben sowie die Tatsache, daß die vier Hauptfarben des Spektrums Blau, Grün, Gelb und Rot sind, gut erklären.

Spielen die Horizontalzellen eine Rolle bei der Codierung der Farben, so reagieren die amakrinen Zellen mit raschen phasischen Depolarisationen auf Helligkeitsänderungen. Die Bipolarzellen schließlich wirken beim Erkennen von Kontrasten mit. Sie besitzen ein antagonistisch gegliedertes rezeptives Feld. So bewirkt z. B. ein Lichtpunkt Hemmung im Zentrum und Erregung in der Peripherie des Feldes.

Analog der spektralen Empfindlichkeit der drei Zapfenpigmente (Abb. 6) kann man sagen, daß die spektrale Empfindlichkeit des Auges insgesamt gering ist für die sehr kurzen (blauen Wellenlängen, ihren höchsten Wert für den grün-gelben Bereich erreicht und dann gegen das rote Spektralende hin wieder abfällt (Superposition der drei Kurven).

Die Bahnen aus der nasalen Hälfte der Retina kreuzen im Chiasma n. optici zur Gegenseite, die Bahnen aus der temporalen Retinahälfte verlaufen ungekreuzt ipsilateral mit den gekreuzten der Gegenseite zu den oberen Vierhügeln und zum Corpus geniculatum laterale. Nach Umschaltung auf das zweite Neuron verläuft die Sehstrahlung (Radiatio optica) weiter zum primären visuellen Cortex im Hinterhauptslappen (Area 17). Von dort gehen weitere Verbindungen zum sekundären und tertiären visuellen Cortex (Area 18, 19) (12,32). Die höheren Zentren nehmen dabei komplexere Aufgaben wahr, z. B. das Verarbeiten von Kontrasten.

2.3 Fragestellung

Während die chromatische Aberration für die reinen Spektralfarben bereits beschrieben und experimentell gut belegt worden ist, fehlen systematische Kenntnisse über das Verhalten der Akkommodation bei Mischfarben noch weitgehend.

Soll das Auge z.B. einen Gegenstand in einer gegebenen Sehentfernung, der ein Gemisch von zwei Wellenlängen aussendet, scharf einstellen, so kann es nur auf eine der beiden Wellenlängen scharf akkommodieren. Notwendigerweise müßte dann der Teil des Bildes, der von der anderen Farbe vermittelt wird, unscharf gesehen werden. Stellt das Auge sei-

ne Brechkraft auf eine Wellenlänge ein, die etwa in der Mitte zwischen den beiden angebotenen liegt, so kann eigentlich in keiner von beiden ein scharfes Bild auf der Netzhaut abgebildet werden. Daher soll untersucht werden, wo sich die Akkommodationslage beim Vorhandensein verschiedener Akkommodationsanforderungen (etwa bei einer Mischfarbe) befindet. Wir wissen ja aus Erfahrung, daß keine unscharfen Bilder auftreten, obwohl die meisten Farben des täglichen Lebens Mischfarben sind.

Die "natürlichen" Mischfarben stellen zumeist ein Gemisch aus vielen Wellenlängen dar, z. B. das ganze Spektrum abzüglich einiger weniger Wellenlängen. Die hier verwendeten, additiv aus zwei Komponenten gebildeten Mischfarben sind der einfachste Fall einer additiven Farbmischung und daher am besten geeignet, das Verhalten der Akkommodation bei Mischfarben zu studieren.

In diesem Zusammenhang soll auch die Akkommodation auf metamere Farben untersucht werden. D. h., es soll die Frage beantwortet werden, ob auf Farben, die gleich aussehen, aber physikalisch nicht gleich sind, auch gleich akkommodiert wird.

Man könnte nun annehmen, daß das Akkommodationszentrum auf das isolierte Angebot zweier verschiedener Wellenlängen so reagiert, daß die Brechkraft zwischen den beiden Farben entsprechenden Brechkraften schwankt oder springt. Die Frequenz dieser hypothetischen Schwankungen läßt sich abschätzen. Nach TOATES (34) zeigt der *M. ciliaris* in seiner Reaktion eine Latenzzeit von 400 ms für nicht periodische Vorgänge (100 - 250 ms für periodische Vorgänge³). Dazu kommt noch die Einstellzeit. Daraus ergibt sich eine eventuelle Frequenz von höchstens 1 - 2 Sprüngen /s.

3) Hinweis darauf, daß Akkommodation erlernbar ist.

Diese hypothetischen und zu untersuchenden Sprünge müßten von den regelhaft zu beobachtenden Schwankungen der Akkommodation (5,6,7,20,25) in Frequenz und Amplitude zu unterscheiden sein. Diese im Vergleich zu reinen Spektralfarben erhöhten Schwankungen in der Brechkraft wären nun für das Auge, das den Gegenstand unter Umständen längere Zeit fixiert halten soll, auch ermüdender. Dieses könnte wiederum zur objektiven Erklärung des Phänomens beitragen, daß manche Farben als besonders unangenehm, grell oder kalt empfunden werden und andere nicht. Sicher ist jedem schon der subjektive Unterschied zwischen weißem Tageslicht und dem von einer Neonröhre ausgestrahlten Weißlicht aufgefallen (19).

Während das weiße Tageslicht ein kontinuierliches Spektrum darstellt, besteht das Licht der Neonröhre nur aus wenigen Spektrallinien (diskretes Spektrum). Die hier verwendeten Mischfarben sind in ihrem spektralen Aufbau dem Neonlicht recht ähnlich.

3. Methodik

In den vorliegenden Versuchen wurde die Brechkraft des Auges objektiv, d. h. mittels eines elektronischen Meßgeräts, bestimmt. Gleichzeitig wurden Vergenz und Pupillenweite mitgemessen.

Die Messung der Vergenz ist hier sinnvoll, weil nach Meinung vieler Autoren (11,18,34) Akkommodations- und Vergenzbewegung aneinander gekoppelt sind. Die Pupillenweite wurde mitgemessen, weil sie ebenfalls die Akkommodation mitbestimmt. Sie steht in unmittelbarem Zusammenhang mit der optischen Abbildungsgüte des Auges und der optischen Schärfentiefe (22). Daneben ist sie auch ein Maß für die einfallende Lichtenergie.

Eine Vergenzreaktion ist stets mit einer Pupillenreaktion verbunden. Eine Konvergenzbewegung z. B. ruft eine Pupillenverengung (Miosis) hervor.

3.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau ist in Abb. 7 und 8 schematisch dargestellt. Er gliedert sich in zwei Abschnitte, nämlich die Erzeugung des bichromatischen Bildes auf dem Testschirm und die Anordnung zur Akkommodationsmessung.

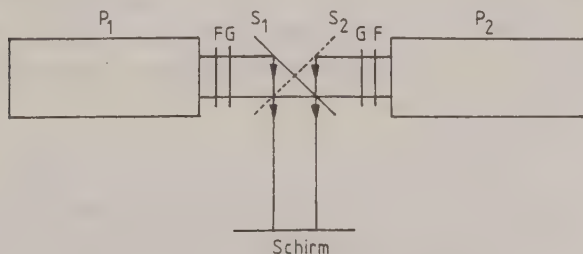


Abb. 7: Erzeugung des bichromatischen Bildes

Spiegel S_1 und S_2 sind übereinander angeordnet. Projektor P_1 steht entsprechend höher und um 15° nach unten geneigt.
F = Farbfilter, G = Graufilter

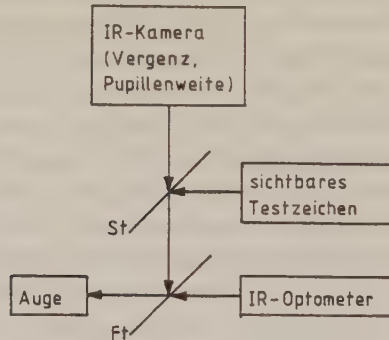


Abb. 8: Einbringung der Meßgeräte in den Strahlen-
gang

Ft = chromatischer Strahlteiler
St = achromatischer Strahlteiler

3.1.1 Projektion

Zur Beleuchtung des Testschirms dienten zwei normale, unbunte Licht aussendende Diaprojektoren. Zur Erzeugung monochromatischen Lichts wurden Interferenzfilter (Fa. Schott, Mainz) vor die Projektoren gesetzt. Die Farbfilter besaßen eine Halbwertsbreite von 11 - 13 nm und eine physikalische Transmission von 41 - 44 %. Folgende Wellenlängen wurden verwendet: 423, 452, 478, 499, 529, 554, 573, 598, 622 und 653 nm.

Das monochromatische Licht aus den beiden Projektoren traf in einem Winkel von je 45° auf zwei Spiegel, die miteinander einen rechten Winkel bildeten

(Abb. 7). Während der eine Projektor waagerecht stand, war der andere um 15° nach unten geneigt. Das von ihm ausgesandte Licht traf in dem genannten Winkel von oben her auf den Testschirm, wo es, mit den Lichtstrahlen aus dem zweiten Projektor vereinigt, ein bichromatisches Bild entwarf. Die Entfernung des Testschirms von der Versuchsperson betrug $33 \frac{1}{3}$ cm (3 dpt).

Durch Graufilter verschiedener Stärke wurde dafür gesorgt, daß auf dem Testschirm bei allen Messungen gleiche Leuchtdichte (gleiche subjektive Helligkeit) herrschte. Die Leuchtdichte wurde bei Filtern über 500 nm mit einem Meßgerät und durch subjektiven Vergleich bestimmt. Sie betrug zwischen 36 und 41 cd/m^2 und befand sich damit nahe der unteren Grenze des photopischen Sehens. Eine genaue Festlegung auf einen Leuchtdichtewert war nicht möglich wegen der nicht unendlich kleinen Abstufungen der vorhandenen Graufilter. Die Abweichung war aber in jedem Fall kleiner als 8 %. Bei den Filtern unter 500 nm wurde die gleiche Leuchtdichte nur durch subjektiven Vergleich bestimmt, da die spektrale Empfindlichkeit des Meßgeräts hier zu stark von der wirklichen (der Versuchsperson) abwich.

Das schwarze Testzeichen befand sich in der Mitte eines Umfeldes (Testschirm) von 9 cm Länge (Blickwinkel von $15,5^{\circ}$) und 4,2 cm Breite ($7,2^{\circ}$). Es war 4,5 mm groß ($0,77^{\circ}$) und hatte die Form eines Malteserkreuzes. Auf farbigem Untergrund stellte es mit seinem hohen Kontrast einen guten Akkommodationsreiz dar.

3.1.2 Meßgeräte

Für die kontinuierliche Messung der Akkommodation wurde ein Infrarot-Optometer nach KRUEGER (19)

- fortentwickelt in (21) - und für die der Pupillenweite und Vergenz eine Infrarot-Kamera verwendet. Die wichtigsten technischen Daten sind in Tab. 1 zusammengestellt.

	Akkommodation	Vergenz und Pupillenweite
Gerät	IR-Optometer	IR-Kamera
Spektralbereich	820 nm	780 nm
Dynamik	18 dpt/s	55 Bilder/s
Auflösung	0,02 dpt	10'

Tab. 1: Technische Daten der verwendeten Meßgeräte

Akkommodationsmessung

Die Arbeitsweise des Optometers beruht auf dem sog. Bildschärfeverfahren (21). Dabei wird dem Auge im Strahlengang des Optometers ein leuchtender Spalt (Testapertur) dargeboten. Der Spalt wird durch eine verstellbare Optometerlinse und den dioptrischen Apparat des Auges auf der Netzhaut scharf abgebildet. Das am Augenhintergrund diffus reflektierte IR-Licht nimmt denselben Weg zurück. Dadurch entsteht nunmehr ein Bild des Spalts in der zur Retina konjugierten Ebene (Abb. 9). In dieser erreicht die Bildschärfe ihren Maximalwert.

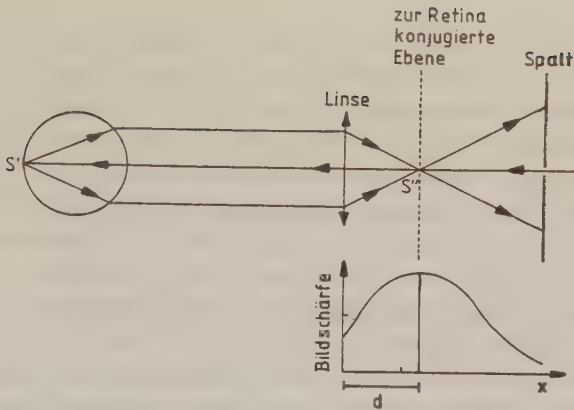


Abb. 9: Arbeitsweise des IR-Optometers (nach (19))

Der Abstand zwischen der zur Retina konjugierten Ebene und der Optometerlinse ist eine Funktion des Akkommodationszustandes.

Pupillenweiten- und Vergenzmessung

Das Auge wird mit infrarotem Licht aus einer kleinen Leuchte bestrahlt. Die Kamera mißt in einer Linie die Intensität des von der Augenvorderfläche reflektierten Lichts. Durch die Justierung wird sichergestellt, daß sich die maximale horizontale Pupillenweite in der Meßlinie der Kamera befindet.

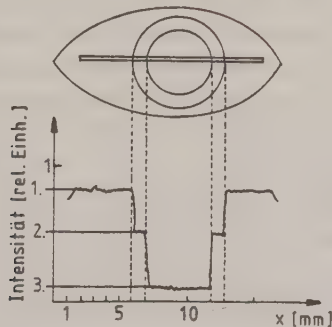


Abb. 10: Registrierbeispiel der Pupillenweite am Monitor der IR-Kamera

Während die helle Bindehaut (Sklera) noch relativ viel IR-Licht reflektiert (Niveau 1 in Abb. 10), ist bei der Regenbogenhaut (Iris) der absorbierte Anteil größer (Niveau 2). Das Sehloch (Pupille) verschluckt fast die gesamte eingestrahlte IR-Intensität, die reflektierte Intensität ist nahe 0 (Niveau 3).

Die jeweilige Lage des Pupillensignals im Vergleich zur Lage beim Blick ins Unendliche bestimmt die Blickrichtung (Vergenz).

Das zur Messung verwendete IR-Licht besaß sein Energiemaximum im Bereich des Überganges vom gerade noch sichtbaren zum infraroten Licht. Die IR-Lichtquelle stellte keinen Akkommodationsreiz dar. Über Strahlteiler wurden die beiden Geräte zur Messung in den Strahlengang eingebracht (Abb. 8).

3.1.3 Versuchsperson

Die Messungen beschränkten sich auf eine Versuchsperson (weiblich, 24 Jahre alt) ohne Refraktionsanomalie. Aufgrund der Prüfung am Anomaloskop von NAGEL und an den Tafeln von ISHIHARA konnte eine Farbenfehlsichtigkeit ausgeschlossen werden. Ihr mon- und binokulares Sehen war unauffällig, ohne Stellungsanomalien der Augenachsen und ihr Visus zwischen 30 cm und 6 m besser als 1,2.

Die Versuchsperson wurde mit einer Kinn- und Stirnstütze einjustiert. Zur Justierung wurde eine Kontrolllampe verwendet, die auf die Pupillenmitte gerichtet war.

3.2 Versuchsbedingungen

Vom beleuchteten Umfeld abgesehen, wurden die Messungen in einem völlig abgedunkelten Raum durchgeführt. Es wurde bei monokularem Sehen gemessen. Dazu wurde das rechte Auge der Versuchsperson mit einer dunklen Klappe bedeckt. Monokulares Sehen wurde dem binokularen vorgezogen, weil nach Meinung vieler Autoren (20,25,34) die Fixation der Augenachsen auf einen Punkt durch das binokulare Sehen stabilisiert wird. Durch monokulares Sehen wird das System des Akkommodations-Vergenz-Regelkreises also destabilisiert und die gewünschten Schwankungen treten deutlicher hervor.

Die IR-Kamera bildete mit der Blickrichtung (optische Achse) einen Winkel von 3^0 , so daß sie kein Hindernis darstellte. Sie war auf das bedeckte Auge gerichtet. Dieses führte nicht zu falschen Ergebnissen, da sich wegen der gleichsinnigen Innervation bei dem bedeckten, "blinden" Auge die gleichen Pupillenweiten- und Vergenzwerte einstellen wie bei dem unbedeckten, "sehenden" Auge. Auf das letztere war das IR-Optometer zur Akkommodationsmessung gerichtet. Die Pupillenweite betrug bei der bereits genannten Leuchtdichte 4 - 5 mm.

Dejustierungen während der Meßzeit waren nicht selten, da die Kopfstütze der Versuchsperson noch eine geringe Bewegungsfreiheit ließ. In diesem Fall mußte die Messung wiederholt werden.

Die Messungen wurden an verschiedenen Tagen durchgeführt, dabei aber eine Meßreihe immer an einem Tag. Vor jeder Messung wurde der Versuchsperson 10 s Zeit zur Adaptation an die Helligkeit des Testschirms gegeben. Diese Zeit wurde möglichst knapp gehalten aufgrund der Vermutung, daß die gewünschten Akkommodationschwankungen auch nur am Beginn der Fixationszeit auf-

treten könnten.

Um Müdigkeiterscheinungen, wie z. B. das "Festklemmen" der Akkommodationsentfernung auf einen bestimmten Wert, vorzubeugen, wurde die Versuchsperson aufgefordert, zwischen den Messungen auf Unendlich zu akkommodieren (etwa aus dem Fenster zu schauen). Danach wurde wieder eine Leuchtdichteadaptation durchgeführt.

3.3 Versuchsdurchführung

Die Meßdauer pro Meßpunkt betrug bei Spektral- und Mischfarben je 20 s. Die dabei aufgenommenen Daten in Akkommodation, Pupillenweite und Vergenz wurden einerseits von einem x-t-Schreiber aufgezeichnet, andererseits von einem Prozeßrechner gespeichert. Zusätzlich zu den eigentlichen Versuchen wurde mit einem Laseroptometer nach KNOLL (17) die Akkommodationsruhelage der Versuchsperson bestimmt, da sie grundlegenden Einfluß auf das Akkommodationsverhalten hat.

In einer Eichmessung wurde die Akkommodation für die eingesetzten, in Absch. 3.1.1 genannten Spektralfarben gemessen. Die sich ergebende "Eichkurve" bildete die Grundlage für die Messungen mit Mischfarben, welche aus diesen Spektralfarben erzeugt wurden.

Folgende Mischungen aus zwei Spektralfarben wurden untersucht:

1. Blau	(423 nm)	+ Rot	(653 nm)
2. Grün	(529 nm)	+ Rot	(622 nm)
3. Gelb	(573 nm)	+ Rot	(653 nm)
4. Türkis	(499 nm)	+ Gelb	(573 nm)
5. Blau	(478 nm)	+ Rot	(653 nm)
6. Blau	(452 nm)	+ Grün	(554 nm)
7. Blau	(478 nm)	+ Gelb	(573 nm)
8. Blau	(478 nm)	+ Orange	(598 nm)

- | | |
|---------------------|-------------------|
| 9. Blau (478 nm) | + Grün (529 nm) |
| 10. Blau (478 nm) | + Türkis (499 nm) |
| 11. Türkis (499 nm) | + Rot (653 nm) |

Der Ort dieser Mischfarben in der Farbtabelle stellt jeweils eine Gerade zwischen den Orten der beiden zugrundeliegenden Spektralfarben dar (Abb. 11).

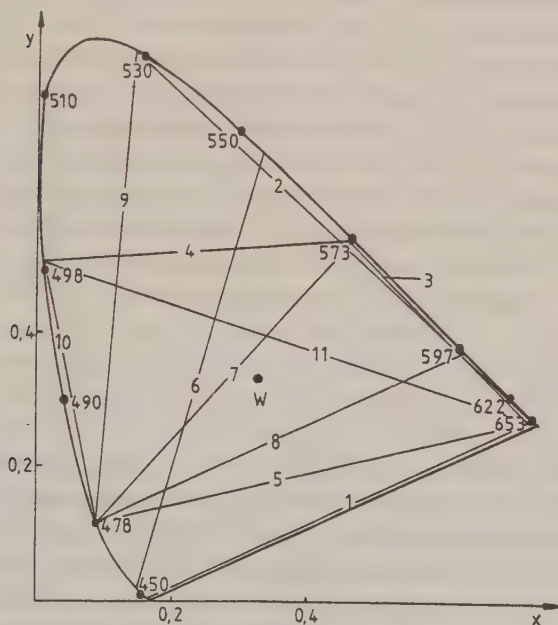


Abb. 11: Farbgerade

Versuch I

Jeder Punkt auf diesen Farbgeraden ist durch ein bestimmtes Intensitätsverhältnis der beiden zugrundeliegenden Spektralfarben bestimmt. Wie in Abschn. 2.2.2 ausgeführt, ist es ratsam, die Verzerrung der Farbtabelle bei der Projektion in eine Ebene konstanter Leuchtdichte zu vernachlässigen. Dann gilt, daß in

der Mitte zwischen den Orten beider Spektralfarben der Äquivalenzpunkt liegt, ein Farbort, an dem beide Komponenten gleiche Leuchtdichteanteile (50:50) aufweisen. Von diesem Punkt ausgehend, wurde für eine Reihe weiterer Leuchtdichteverhältnisse die Akkommodation bestimmt. Neben den beiden reinen Spektralfarben handelte es sich um folgende Intensitätsverhältnisse: 15:85, 20:80, 25:75, 33:67, 40:60, 50:50, 60:40, 67:33, 75:25, 80:20 und 85:15 relative Leuchtdichteanteile. Zusammen mit den Werten für die beiden Spektralfarben wurde also auf jeder Geraden für 13 Farborte die Akkommodation gemessen. Diese Farborte bestimmt man, indem man die Intensitätsverhältnisse als Strecken-Teilungsverhältnisse auf die jeweilige Farbgerade überträgt. Die Reihenfolge der Intensitätsverhältnisse bei der Messung war pseudostochastisch.

Versuch II

Bei den Farbgeraden von Versuch I befinden sich die Partner in den eingesetzten Spektralfarbenpaaren in einer unterschiedlichen spektralen Entfernung zueinander. Zur Kontrolle diente daher eine weitere Meßreihe. Darin sollte der Einfluß der spektralen Entfernung der Komponenten einer Mischfarbe auf die Akkommodationsentfernung untersucht werden. Dazu wurden Mischfarben gewählt, deren einer Anteil konstant gehalten wurde (nämlich ein Blau von 423 bzw. 478 nm) und deren zweite Komponente im Rahmen der vorhandenen Filter variiert wurde. Dadurch ergaben sich Mischfarben, deren "Grundfarben" im Spektrum unterschiedlich weit voneinander entfernt lagen, aber mit einem konstanten Blauanteil. Die Versuchsbedingungen waren gleich denen bei Versuch I, aber die Messungen wurden hier nur bei gleicher

(50:50) Leuchtdichte der beiden eingesetzten "Grundfarben" durchgeführt.

3.4 Auswertung

Die gewonnenen Daten über Akkommodation, Pupillenweite und Vergenz (3 Datenkanäle) wurden in einem Prozeßrechner gespeichert. Dabei erfolgte die Datenübertragung nicht kontinuierlich, sondern die aktuellen Meßwerte der Geräte wurden alle 0,1 s ins Datenfeld des Rechners übernommen.

Aus den übernommenen Werten wurde vom Rechner der Mittelwert (aus 200 Einzelwerten) gebildet und ausgedruckt, dazu die Standardabweichung. Zusätzlich wurde der Korrelationskoeffizient r berechnet, ferner die Steigung und der Ordinatenabschnitt der Regressionsgeraden während der Meßzeit.

Aus dem Schreiberprotokoll wurde die Spannweite (Bandbreite) des Akkommodationsverlaufes während der Meßzeit abgelesen. Weiter wurde die Zahl der Sakkaden (schnelle Augenbewegungen), als Ausdruck eines angespannten Akkommodationszustandes, abgezählt. Zusammen mit der Standardabweichung des Akkommodationsmittelwertes dienten die beiden genannten Parameter zur Charakterisierung der Akkommodationsschwankungen.

Da diese Fluktuationen mit wachsendem Sollwert zunehmen (20), ist es vorteilhaft, die Schwankungsparameter zum Vergleich auf den jeweiligen Akkommodationsmittelwert zu beziehen. Die auf den Mittelwert bezogene Standardabweichung heißt "Variationskoeffizient".

4. Ergebnisse

4.1 Akkomodationsmessungen an Spektralfarben

Die bei den einzelnen Spektralfarben gemessene Akkommodation (Entfernung) siehe Tab. 2. Jeder Punkt des Diagramms (Abb. 12) repräsentiert eine Messung. Die chromatische Aberration beträgt im vorliegenden Fall 2,12 dpt zwischen 423 und 653 nm. Wie aus dem Diagramm hervorgeht, liegt die Einstellwellenlänge hier bei rund 570 nm, denn nur für diese Wellenlänge entspricht die gemessene Akkommodation auch dem durch die Testzeichenentfernung vorgegebenen Sollwert von 3 dpt.

Wellenlänge (nm)	Akk.- $\bar{x}$ (dpt)	s (dpt)	Bb. (dpt)	Sak./10 s
423	1,48	0,058	0,5	10
452	1,75	0,083	0,7	13
478	2,23	0,082	0,7	15
499	2,44	0,100	0,8	13
529	2,66	0,094	0,75	17
554	2,72	0,095	0,8	14
573	2,99	0,100	0,65	17
598	3,32	0,109	0,75	16
622	3,25	0,115	1,05	18
653	3,60	0,108	1,0	19
Weiß	2,56	0,084	0,75	18

Tab. 2: Eichmessungen an Spektralfarben

x: Mittelwert

s: Standardabweichung

Bb.: Bandbreite des Akkommodationsverlaufes

Sak.: Zahl der Sakkaden

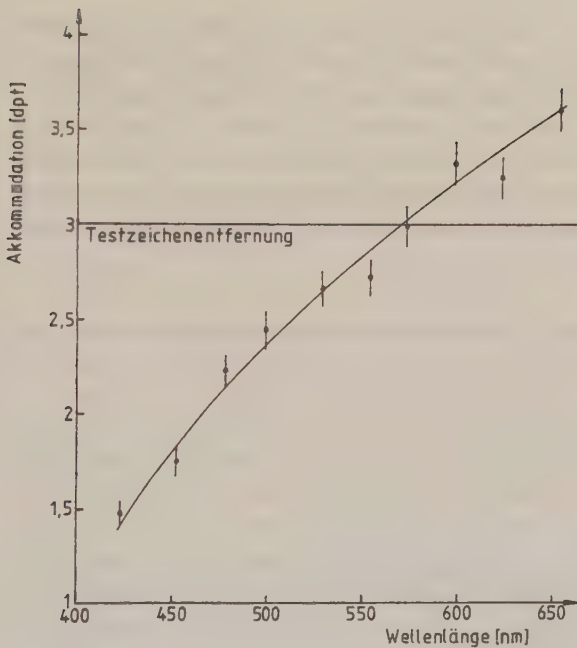


Abb. 12: "Eichkurve"

Es fällt auf, daß sowohl (a) die Standardabweichung des Akkomodationsmittelwertes als auch (b) die Bandbreite des Akkomodationsverlaufes als auch (c) die Zahl der Sakkaden in 10 s mit steigender Wellenlänge und steigender Akkomodationsanforderung⁴ zunehmen.

Trägt man diese Schwankungsparameter (a - c) gegen die Wellenlänge auf, so bilden sie mit (a) $r = 0,89$ bzw. (b) $r = 0,79$ bzw. (c) $r = 0,88$ eine Gerade po-

4) Entfernung vom Wert der Akkomodationsruhelage

sitiver Steigung. Trägt man die Schwankungsparameter gegen die Akkommodationsmittelwerte auf, so korrelieren diese mit im Vergleich zu oben etwa gleich hohen positiven Koeffizienten, nämlich (a) $r = 0,91$ bzw. (b) $r = 0,74$ bzw. (c) $r = 0,89$. Die Bandbreite des Akkommodationsverlaufes scheint sich hierbei weniger regelhaft zu verhalten als die beiden anderen Parameter.

4.2 Versuch I: Akkommodationsmessungen auf den 11 Farbgeraden

Im Hauptteil der Untersuchungen wurde die Akkommodationsentfernung für die verschiedenen Farbtorte auf den Farbgeraden (siehe Abb. 11) bestimmt. An jedem der Farbtorte erfolgte eine Messung. Die Meßergebnisse siehe Tab. 3 (im Anhang). Sie sind in Abb. 13 (ebenfalls im Anhang) graphisch dargestellt. Die Diagramme zeigen den Verlauf der Akkommodation beim Durchfahren der Farbgeraden vom Ort der einen Spektralfarbe zum Ort der anderen. Die Meßpunkte bestimmen mit mehr oder weniger guter Näherung eine Kurve. Die Korrelation verbessert sich in den meisten Fällen, wenn man mehrere schräg aufeinander stehende Geradenstücke durch die Meßpunkte legt.

4.2.1 Farbgerade außerhalb des "Purpurdreiecks" (Abb. 13 b,c,d,i,k)

Bei den außerhalb des basalen "Purpurdreiecks" verlaufenden Farbgeraden Nr. 2 und 9 nimmt die Akkommodationsentfernung in einem sigmoiden Verlauf zu, wenn man den Anteil der jeweils höheren Wellenlänge erhöht. Bei der Geraden Nr. 10 ist der sigmoide Verlauf weniger deutlich. Bei den Geraden Nr. 3 und 4 scheint der Akkommodationsverlauf leicht parabolisch zu sein, jedoch sind die Meßwerte stark gestreut und

daher ist der Kurvenverlauf nicht eindeutig.

4.2.2 Farbgerade durch den Unbuntpunkt (Abb. 13 f,g,l)

Farbgerade Nr. 7 läuft nahe am Unbuntpunkt vorbei. Die zugrundeliegenden Spektralfarben sind einander nahezu komplementär. Hier ist die Streuung der Meßwerte sehr groß.

Bei der etwas weiter entfernt den Unbuntpunkt passierenden Geraden Nr. 11 ist der Akkommodationsverlauf eindeutig parabolisch, bei der Geraden Nr. 6 anscheinend geschwungen oder ebenfalls parabolisch.

4.2.3 Farbgerade durch das "Purpurdreieck" (Abb. 13 a,e,h)

Die Farbgeraden Nr. 1, 5 und 8 passieren das basale "Purpurdreieck". Die spektralen Komponenten dieser Mischfarben, Blau und Rot, weisen den höchsten Brechkraftunterschied aller eingesetzten Spektralfarbenpaare auf, nämlich bis zu 2 dpt. Der Akkommodationsverlauf ist hier deutlich parabolisch, zum Teil mit einem weiteren Abfall und Minimum im Blaubereich.

4.3 Akkommodationsschwankungen bei Mischfarben

Wenn man, ausgehend von 100 % relativer Leuchtdichte der jeweils kürzeren Wellenlänge, den Anteil der längeren Wellenlänge in der Mischung kontinuierlich erhöht, so steigt in 8 von 11 Fällen (Farbgeraden) auch die Standardabweichung des Akkommodationsmittelwertes, in 9 von 11 die Bandbreite des Akkommodationsverlaufes und in 8 von 11 die Zahl der Sakaden in 10 s. Die Zahl der "Ausreißer", die das Bild stören, ist allerdings hoch und die Korrelation niedrig.

Auch bei Mischfarben nimmt also im großen und ganzen die Schwankung der Akkommodation mit steigender Akkommodationsanforderung (zunehmender Anteil der längerwelligen Farbe) ebenfalls zu.

Die Amplitude der beobachteten Akkommodationsschwankungen ist selten größer als 0,2 dpt. Von einem Hin- und Herspringen der Akkommodation zwischen den Sollwerten der beiden zugrundeliegenden Spektralfarben kann daher nicht gesprochen werden, da der Unterschied der Akkommodationsanforderungen zumeist wesentlich größer als 0,2 dpt ist. Allerdings waren zu Beginn der Fixationszeit kurzzeitige höheramplitudige Schwankungen (bis 1 dpt) zu beobachten (in Abb. 14 mit einem Pfeil bezeichnet). Die Schwankungsfrequenz betrug zwischen 1,2 und 2 Hz.

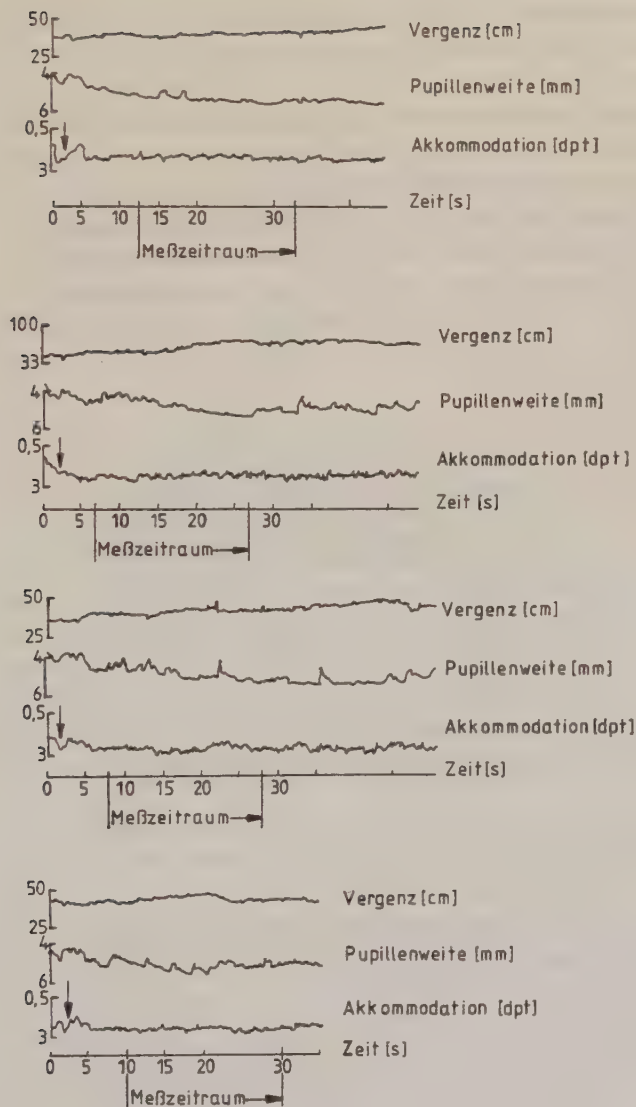


Abb. 14: Schwankungen und Suchbewegungen der Akkommodation (Erklärung siehe Text)

4.3.1 Vergleich der Schwankungsparameter Spektralfarben - Mischfarben

Da zwischen den Akkommodationsschwankungen und der Akkommodationsentfernung eine lineare Beziehung angenommen werden kann, wurden alle Schwankungsparameter zum Vergleich auf den zugehörigen Akkommodationsmittelwert bezogen. Tab. 4 zeigt, aufgeschlüsselt nach Farbgeraden, den Vergleich der durchschnittlichen Schwankungen bei den verschiedenen Mischungsverhältnissen mit den bei den zugrundeliegenden Spektralfarben.

Farbgerade	$s/\bar{x}$		$Bb./\bar{x}$		$Sak./\bar{x}$	
	Sf.	Mf.	Sf.	Mf.	Sf.	Mf.
1	0,0348	0,0552	0,338	0,468	4,91	8,35
2	0,0354	0,0382	0,283	0,272	5,96	4,82
3	0,0317	0,0373	0,248	0,314	5,49	5,76
4	0,0372	0,0382	0,242	0,313	5,51	5,48
5	0,0334	0,0440	0,275	0,359	6,01	6,94
6	0,0412	0,0434	0,300	0,302	6,29	7,14
7	0,0351	0,0386	0,266	0,292	6,21	7,96
8	0,0348	0,0420	0,263	0,287	5,10	6,71
9	0,0361	0,0400	0,315	0,294	5,59	6,64
10	0,0389	0,0442	0,291	0,320	5,77	7,43
11	0,0355	0,0337	0,251	0,282	5,31	8,85

Tab. 4: Vergleich der durchschnittlichen, auf den Mittelwert bezogenen Schwankungsparameter

	$s/\bar{x}$ (Sf.-Mf.)	$Bb./\bar{x}$ (Sf.-Mf.)	$Sak./10 s/\bar{x}$ (Sf.-Mf.)
t	2,96	2,08	3,21
p	< 0,02	< 0,1	< 0,01

Tab. 5: Vergleich der Schwankungsparameter, t-Test

Mit einem t-Test für verbundene Stichproben (siehe Tab. 5) wurde untersucht, ob die Schwankungsparameter

ter bei Mischfarben signifikant höher sind als bei den zugehörigen Spektralfarben. Dabei ergab sich bei der Standardabweichung des Akkommodationsmittelwertes und bei der Sakkadenzahl ein befriedigendes Signifikanzniveau ($p^5 < 0,02$ bzw. $< 0,01$), bei der Bandbreite hingegen nicht ($p < 0,1$). Die Bandbreite des Akkommodationsverlaufes scheint sich dabei wieder weniger regelhaft zu verhalten als die beiden anderen Parameter.

4.3.2 Schwankungsgipfel

Es wurde die Frage untersucht, ob die Schwankungsparameter an den Äquivalenzpunkten oder in deren näherer Umgebung (z. B. Intensitätsverhältnis 60:40 oder 40:60) signifikant höher sind als im Durchschnitt aller Mischungsverhältnisse. Dazu wurde wieder ein t-Test für verbundene Stichproben verwendet. Die Testergebnisse sind hier nicht dargestellt. Es ergab sich jedoch kein Hinweis darauf, daß bei gleicher Intensität der beiden eingesetzten Spektralfarben die Schwankungen am größten sind. Gemachte Beobachtungen dieser Art müssen als zufallsbedingt angesehen werden.

4.4 Versuch II

Versuch II diente dazu, den Einfluß der spektralen Entfernung der zugrundeliegenden Spektralfarben auf die Akkommodation der Mischung zu untersuchen. Bei diesen Mischfarbenreihen wurde die eine Komponente (Blau von 423 bzw. 478 nm) konstant gehalten und die andere variiert. Die Ergebnisse sind in Tab. 6 und Abb. 15 dargestellt. Jeder Punkt der beiden Kurven in Abb. 15 repräsentiert eine Messung.

Wellenlängen (nm)	Akk.- $\bar{x}$ (dpt)	s (dpt)	Bb. (dpt)	Sak./10 s
423	1,48	0,058	0,5	10
423 + 452	1,32	0,065	0,45	13
478	1,73	0,077	0,75	20
499	1,50	0,066	0,8	14
529	1,99	0,108	0,85	18
554	2,43	0,088	0,9	17
573	2,35	0,100	0,75	24
598	2,66	0,124	0,75	19
622	2,78	0,116	0,9	19
653	1,65	0,091	1,2	20
478	2,23	0,082	0,7	15
478 + 499	1,52	0,082	0,75	23
529	1,88	0,095	0,9	20
554	2,01	0,133	0,8	22
573	1,91	0,090	0,75	23
598	2,23	0,085	0,65	28
622	2,16	0,109	0,9	23
653	1,75	0,086	0,9	25

Tab. 6: Versuch II (Erklärung siehe Text)

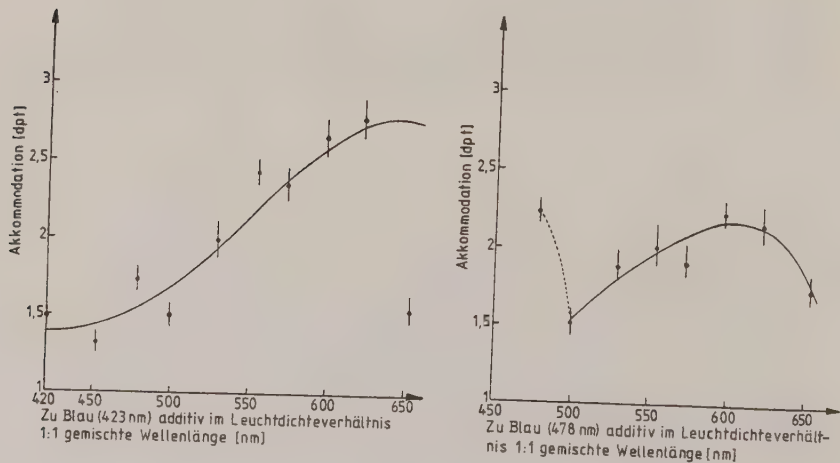


Abb. 15: Versuch II (Erklärung siehe Text)

Es zeigte sich, daß in einem weiten Spektralbereich, beginnend etwa 50 nm oberhalb des jeweils verwendeten Blau, die Akkommodationsentfernung proportional zur zugemischten Wellenlänge ansteigt. Wurden dagegen Farben des roten Spektralendes zugemischt, ergab sich wieder ein Abfall. Beim Zumischen von dem Blau eng benachbarten Wellenlängen blieb die Akkommodation bei Kurve 1 (links) annähernd konstant, bei Kurve 2 (rechts) fiel sie beim Zumischen grüner Farbtöne noch unter das Niveau des verwendeten Blau selbst ab. Die Schwankungsparameter verhielten sich wieder in etwa proportional zum jeweiligen Akkommodationsmittelwert.

4.5 Linien gleicher Refraktion in der Farbtafel

Ein Mischungsverhältnis mit $x:y$ relativen Leuchtdichteanteilen beider zugrundeliegender Spektralfarben erhält einen Punkt auf der zugehörigen Farbgeraden der Farbtafel zugeordnet, der die Strecke zwischen den Orten der beiden Spektralfarben im Verhältnis $y:x$ teilt.

Die bei den einzelnen Mischungsverhältnissen gemessenen Akkommodationswerte (Tab. 3) werden nun mit diesen in die Farbtafel übertragen. Alle Punkte gleicher Akkommodation (Refraktion) bilden dabei eine "Isorefraktionslinie", die das Farbdreieck durchzieht. Einige dieser Linien sind in Abb. 16 dargestellt. Der genaue Linienverlauf läßt sich z. T. nur näherungsweise festlegen.

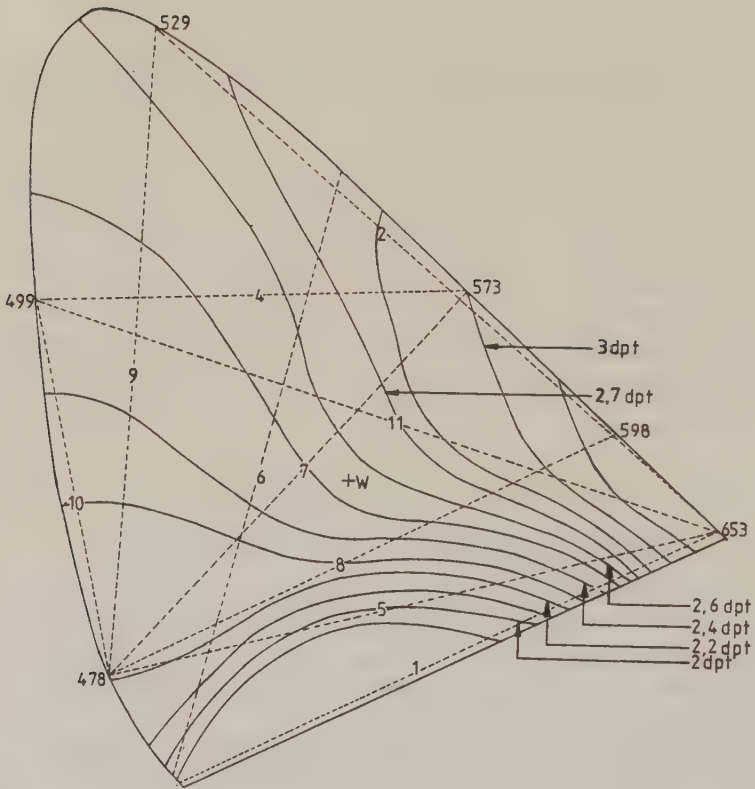


Abb. 16: Linien gleicher Akkommodation in der Farbtabelle (für bichromatische Farbmischungen)

Beim Eintritt in das basale "Purpurdreieck" weisen diese Linien eine deutliche Richtungsänderung zum roten Spektralende hin auf. Im Purpurdreieck selbst sind alle Linien in Richtung des roten Spektralendes abgedrängt. Darin kommt zum Ausdruck, daß bei einer Mischung Blau/Rot die dem Blau entsprechende Akkommodationsentfernung erst bei überproportional hohem Rotanteil verlassen wird.

Im Bereich des blauen Spektralendes verlaufen diese Linien in Form von anscheinend konzentrischen Kreisbögen. Die durch das Purpurdreieck verlaufenden Farbgeraden Nr. 1 und 5 werden von den Isoakkommodationslinien zweimal geschnitten.

Im Bereich oberhalb des basalen Purpurdreiecks ist der Verlauf der Linien annähernd parallel und geradlinig. Der Schnittpunkt einer solchen Linie mit dem äußeren Spektralfarbenzug markiert eine Spektralfarbe mit dieser Refraktion.

Akkommodation am Unbuntpunkt und Akkommodationsruhelage

Die Akkommodationsentfernung auf Weißlicht (Unbuntpunkt W_f der Farbtafel) betrug 2,56 dpt bei einer Testzeichenentfernung von 3 dpt. Wie bereits ausgeführt, wird diese Abweichung vom Sollwert durch den immer vorhandenen Einfluß der Akkommodationsruhelage verursacht.

Die individuelle Ruhelage der Versuchsperson lag bei $0,82 \pm 0,18$ dpt. Dieser Wert stellt einen Mittelwert aus 8 Einzelmessungen dar. Diese wurden mit einem Laseroptometer durchgeführt. Die Akkommodationsentfernung bei Ruhelage war damit größer als die bei allen Akkommodationsmessungen an Farben.

4.6 Subjektives Empfinden der Purpurfarben

Nach den Angaben der Versuchsperson sind die im Purpurdreieck vorkommenden Mischfarben (Purpurfarben) äußerst unangenehm zu fixieren. Es wurden Farbsäume beobachtet oder das Testzeichen extrem unscharf gesehen.

Die auf den jeweiligen Mittelwert bezogenen Schwankungsparameter sind bei den Purpurfarben in der Tendenz höher als bei den übrigen Mischfarben. Am höchsten sind sie bei der am weitesten basal verlaufenden Farbgeraden Nr. 1. Da die Fallzahl zu gering ist, wurde hierüber kein statistischer Test durchgeführt. Die im oberen Teil der Farbtafel vorkommenden Mischfarben wurden subjektiv nicht unangenehmer empfunden als die zugehörigen Spektralfarben.

5. Diskussion

5.1 Deutung von Versuch I und II

Es spricht alles dafür, daß das Auge beim isolierten und simultanen Angebot zweier Wellenlängen versucht, den akkommodativen Aufwand möglichst gering zu halten. Es toleriert Fehleinstellungen bezogen auf die Testzeichenentfernung (34). So ist auch zu verstehen, daß die optische Schärfentiefe bei einer stark von der jeweiligen Ruhelage abweichenden Testzeichenentfernung assymmetrisch angeordnet ist (22). Bei einer Objektentfernung von 3 dpt erstreckt sie sich von 33 bis 40 cm, also in Richtung geringerer akkommodativer Anstrengung.

Die Minimierung des Akkommodationsaufwandes erklärt den nichtlinearen Verlauf der Akkommodation beim Zumischen steigender Anteile einer höheren Wellenlänge. Warum sich nicht bei allen 11 Farbgeraden derselbe Akkommodationsverlauf zeigt, folgt wohl aus der unterschiedlichen spektralen Entfernung der Spektralfarbenpaare sowie deren Lage in der Farbtabelle-

Bei einer Mischung Blau/Rot (Farbgerade Nr. 1, 5 und 8) stellt die Farbe des roten Spektralendes die höhere Akkommodationsanforderung dar. Daher bewegt sich die Akkommodationslage bei zunehmendem Rotanteil noch überproportional lange auf dem Niveau des Blauen. Die beobachteten Abfälle im blauen Bereich lassen sich als ein Zurückkehren zur Ruhelage deuten. Es erfolgt wohl aus Irritation über das simultane Angebot zweier stark unterschiedlicher Sollwerte. Die Tendenz, zur Ruhelage zurückzukehren, ist natürlich bei allen Mischungsverhältnissen ausge-

prägt. Ein hoher roter Leuchtdichteanteil kompensiert diesen "Sog" allerdings wieder.

Bei den außerhalb des Purpurdreiecks verlaufenden Farbgeraden ist der Akkommodationsverlauf ebenfalls parabolisch oder sigmoid (Nr. 2, 10). Bei einer Mischung aus z. B. Blau und Grün stellt die Mischfarbe ebenfalls ein dem spektralen ähnliches Blau oder Grün dar, aber es entstehen keine gänzlich neuen Farbtöne. Es ist daher einleuchtend, wenn sich die Akkommodationslage etwa auf dem Niveau der jeweils vorherrschenden Spektralfarbe bewegt. Nahe des Äquivalenzpunktes befindet sich eine Übergangszone. Neben den beiden beschriebenen Typen gibt es Mischformen, wie z. B. Farbgerade Nr. 3, 6 und 7. Letztere geht nahe am Unbuntpunkt W_f vorbei. Die starke Streuung der Meßwerte erschwert hier eine Interpretation.

Neben der jeweiligen Lage der Farbgeraden beeinflusst auch die spektrale Entfernung der Spektralfarbenpaare den Akkommodationsverlauf. Versuch I zeigte, daß ab einer Wellenlängendifferenz von 100 nm aufwärts der parabolische Akkommodationsverlauf zum roten Spektralende hin zunehmend deutlicher wird. Die Ergebnisse von Versuch II legen den Schluß nahe, daß der Einfluß der Ruhelage besonders groß ist bei eng benachbarten ($\Delta < 50$ nm) oder sehr weit voneinander entfernten ($\Delta < 150 - 200$ nm) Spektralfarbenpaaren.

Die Tatsache, daß das Akkommodationssystem bereit ist, auch Bilder höchster Unschärfe zu tolerieren, wurde in der Literatur bereits beschrieben. MILLODOT & RONCHI (28) stellten fest, daß sich die objektiv gemessene Akkommodation trotz Einbringens verschiedenen starker Linsen so gut wie nicht änderte. Die Erklärung ist, daß ihre Versuche bei zu geringer Beleuchtung durchgeführt wurden (6 cd/m^2). Eine ähnliche Beobachtung machte FINCHAM (10).

5.2. Akkommodation bei bedingt-gleichen Farben

Im Diagramm der Isoakkommodationslinien (Abb. 16) wird für verschiedene Farbarten der Farbtafel die zugehörige Akkommodationsentfernung angegeben. Dabei bleibt unberücksichtigt, daß eine Farbart auf verschiedene Weise erzeugt werden kann, d. h., daß der zugehörige Farbort auf verschiedenen Farbgeraden liegen kann. Das Diagramm gemäß Abb. 16 kann daher nur gültig sein, wenn auf Farbarten, die gleich aussehen, aber physikalisch nicht gleich sind, auch gleich akkommodiert wird.

Um dieses nachzuprüfen, wurden exemplarisch 8 Farborte (A - H in Abb. 17) gewählt, für die in Versuch I die Akkommodationsentfernung bestimmt worden war. A - E stellen Kreuzungspunkte zweier Farbgeraden dar. F - H befinden sich in unmittelbarer Nähe des äußeren Spektralfarbenzuges bzw. von W_F . Ihre Akkommodationsentfernung kann mit der der bunttongleichen Spektralfarbe bzw. von Weißlicht verglichen werden, weil der Sättigungsunterschied gering ist.

Farbort (Abb. 17)	Farbgerade bzw. Spektralfarbe	Intensitätsverhältnis	Akk.- $\bar{x}$ (dpt)
A	11	36:64	2,60
	6	65:35	2,62
B	4	62:38	2,58
	6	80:20	2,69
C	6	35:65	2,34
	7	30:70	2,35
D	8	86:14	2,98
	11	74:26	3,04
E	9	46:54	2,29
	11	15:85	2,46
F	grün 554 nm	---	2,72
	2	34:66	2,74
G	gelb 573 nm	---	2,99
	2	57:43	2,36
H	weiß	---	2,56
	7	58:42	2,40

Tab. 7: Akkommodation bei bedingt-gleichen Farben

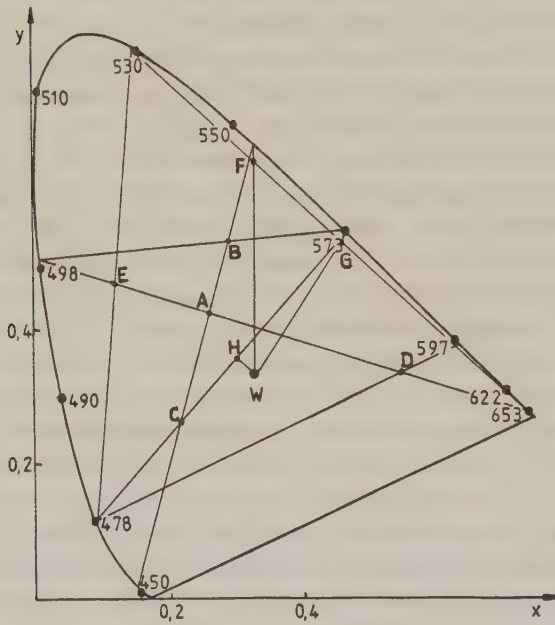


Abb. 17: Farborte, die auf verschiedene Weise erreicht werden können

Es zeigt sich, daß die Akkommodationsentfernung für die 8 Farbarten, die auf verschiedene Weise erzeugt worden sind, immer den gleichen Wert (innerhalb der einfachen Standardabweichung) anzunehmen scheint (Tab. 7). Daraus der Schluß, daß auf bedingt-gleiche Farben auch in gleicher Weise akkommodiert wird. Obwohl bei bedingt-gleichen Farben Unterschiede in der retinalen Schärfe ihres Bildes bestehen müssen, führt dieses offensichtlich zu keinem sichtbaren Unterschied in ihrer Akkommodationsentfernung. Daraus könnte man schließen, daß auch die Farbempfin-

dung, über die Erfordernisse der Brechkräfte hinaus, Einfluß auf den Akkommodations-Vergenz-Regelkreis hat.

Die Aussage, daß auf Farben, die gleich aussehen, aber physikalisch nicht gleich sind, kann sich allerdings vorerst nur auf Spektralfarben und aus zwei Spektralfarben additiv hergestellte Mischfarben beziehen. Über anders aufgebaute Farbreize kann (noch) nichts ausgesagt werden.

Da der Vergleich der 8 Farborte (Tab. 7) noch keine signifikante Aussage zuläßt, bedarf dieser Punkt noch einer weiteren Klärung.

5.3 Betrachtung der Isorefraktionslinien der Farbtafel

Die in Abb. 16 eingezeichneten Linien stellen nur eine bestmögliche Näherung dar. Sie wurden aufgrund der Ergebnisse von Versuch I bestimmt; daher kann ihre Validität auf keinen Fall höher sein als die von Versuch I.

Die Lage dieser Linien ist stark von der Akkommodationsruhelage abhängig, die nach LEIBOWITZ & OWENS (24) eine große interindividuelle Streuung ausweist. Der Linienverlauf gemäß Abb. 16 ist daher wohl nur für diese Versuchsperson mit ihrem Wert der Ruhelage charakteristisch. Reihenuntersuchungen an mehreren Probanden, deren Ruhelage nicht denselben Wert aufweist, dürften deshalb problematisch sein.

KRUEGER & MADER (23) führten ebenfalls Akkommodationsmessungen an Mischfarben durch. Sie mischten zu verschiedenen Spektralfarben ein Unbunt variabler Intensität, so daß sich Farbtöne ergaben, die sich nur in ihrer Sättigung unterschieden. Farbarten gleichen Bunttons, aber verschiedener Sättigung lie-

gen im Farbdreieck auf Geraden vom Unbunt punkt W_f zum Ort der entsprechenden Spektralfarbe. Es ergab sich, daß sich die Akkommodationsentfernung bei abnehmender Sättigung (zunehmender Zumischung von Unbunt) überproportional schnell auf die des Unbunten reduziert.

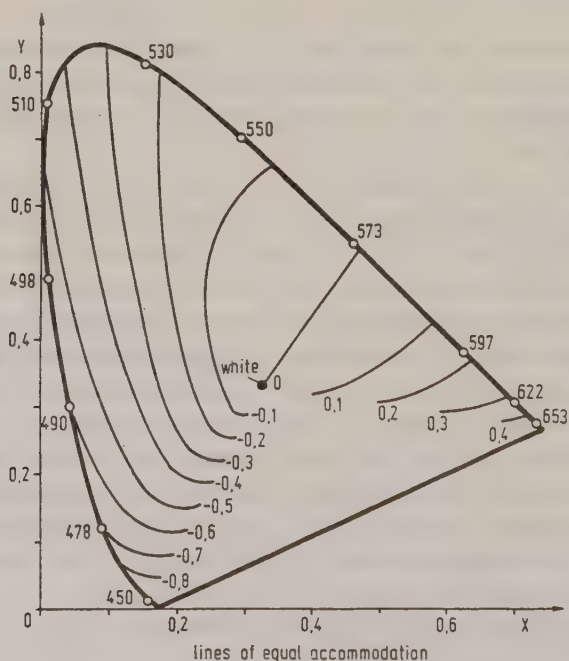


Abb. 18: Linien gleicher Refraktion nach KRUEGER & MADER (23) für Farbmischungen aus monochromatischem Licht und Unbunt

Daraus ist wohl zu schließen, daß jedes Diagramm für sich genommen Gültigkeit besitzt, aber nur für Mischfarben, die auf die entsprechende Art und Weise hergestellt worden sind. Es kann nicht auf anders erzeugte Mischfarben übertragen werden. Es ist daher zweifelhaft, ob es überhaupt einen universellen Verlauf dieser Isoakkommodationslinien gibt, der für auf beliebige Art und Weise erzeugte Mischfarben und für alle Versuchspersonen gilt.

5.4 Betrachtung der Akkommodationsschwankungen

Die Zahl der Sakkaden im Meßzeitraum stellt ein ungefähres Maß für die Schwankungsfrequenz dar. Die Bandbreite markiert die Differenz zwischen der höchsten und tiefsten, während der Meßzeit auftretenden Akkommodationsentfernung. Die Standardabweichung stellt ein rechnerisches Maß für die Streuung der Meßwerte dar.

Wie sich zeigte, beschreiben diese drei Parameter die Schwankungen im Akkommodationsverlauf recht gut. Sie korrelieren untereinander nur mit geringen ($r < 0,3$), positiven Werten. Sie sind also voneinander weitgehend unabhängig.

Nach MILLODOT (25) beruhen diese "Mikrofluktuationen der Akkommodation" auf Gleichgewichtsstörungen des M. ciliaris. Sie sind etwa dem Ruhetremor vergleichbar. Es gibt in der Literatur einige Hinweise darauf, daß die Fluktuationen mit zunehmender Akkommodationsanforderung anwachsen (20,25). Bei schlechten visuellen Bedingungen (geringe Beleuchtung usw.) wachsen sie ebenfalls an (22). Man kann diese Schwankungen der Akkommodationsentfernung als einen Versuch auffassen, Fehleinstellungen so bald als möglich zu korrigieren.

Die Frequenz dieser Schwankungen soll hauptsächlich bei 0,5 Hz liegen, mit einem weiteren Gipfel bei 1,5 - 2 Hz (6). Dieser zweite Gipfel ist allerdings fragwürdig, da er auch eine Eigenschwingung der Meßapparatur darstellen könnte. Ihre hauptsächlichliche Amplitude liegt etwas unter 0,1 dpt (1).

Die in der vorliegenden Untersuchung beobachteten Schwankungen entsprechen bezüglich ihrer Amplitude den in der Literatur beschriebenen. Ihre Frequenz ist höher als in der Literatur beschrieben, was als Zeichen einer Irritation des Akkommodationsapparates gewertet werden kann. Zu Beginn der Fixationszeit traten vereinzelt höheramplitudige Schwankungen auf, die als Suchbewegungen gedeutet werden können.

Die Fluktuationen der Akkommodation sind beim Fixieren einer bichromatischen Mischfarbe signifikant höher als im Durchschnitt der beiden zugrundeliegenden Spektralfarben. Dieses läßt sich deuten als Irritation des Akkommodationsapparates über das simultane Angebot zweier verschiedener Akkommodationsanforderungen und die daraus resultierende zwangsläufige Fehleinstellung.

5.5 Schlußfolgerungen

5.5.1 Folgerungen für den Bildschirmarbeitsplatz

Es hat sich gezeigt, daß bei einer Mischung Blau/Rot die Akkommodationsentfernung selbst bei zunehmendem Rotanteil noch auf dem Niveau des Blauen verharret. Diese Tatsache zeichnet Blau als die bezüglich des akkommodativen Aufwandes günstigere Farbe aus. In der arbeitsphysiologischen Literatur wird vor der Verwendung gesättigter blauer und roter Zeichen am Bildschirm gewarnt, da bei den Spektral-

enden der Brechkraftunterschied zum durch die Objektentfernung gegebenen Sollwert besonders hoch ist. Anhand obiger Feststellung sollte dann immer noch dem Zeichen aus spektralem Blau der Vorzug gegeben werden.

Für die Entscheidung zwischen einem blauen und einem roten Sehzeichen muß allerdings auch die individuelle Ruhelage des Benutzers und die Zeichenentfernung berücksichtigt werden.

5.5.2 Abschließende Betrachtung des Akkommodations-Vergenz-Regelkreises

Obwohl in der Literatur weit verbreitet, ist die Verwendung des Wortes "Regelkreis" im technischen Sinne hier wohl nicht ganz unbedenklich. Von diesem "Regelkreis" sind noch nicht alle Glieder vollständig erforscht und beschrieben worden.

Der Sollwert des Regelkreises ist die optimale retinale Bildschärfe. Jedoch existiert bei Farben, die aus mehreren Wellenlängen aufgebaut sind - also bei den meisten Farben des täglichen Lebens - gar kein eindeutiger Sollwert. Auch große und größte Sollwertabweichungen werden u. U. toleriert, ohne daß eine Reaktion des Akkommodationsapparates erfolgt. LEIBOWITZ & OWENS (24) stellten z. B. beim Fixieren eines grauen (unbunten) Hausdaches bei hellem Tageslicht (Leuchtdichte 10^4 cd/m^2) in 200 m Entfernung noch eine durchschnittliche Akkommodationsentfernung von 0,71 dpt fest, obwohl unter diesen Bedingungen rund 0 dpt erwartet werden müßte.

Auch sind, neben vielen anderen Größen, sogenannte höhere Funktionen befähigt, in den Akkommodationsprozeß einzugreifen. Es gibt Hinweise darauf, daß die Akkommodation erlern- und trainierbar ist (9,35).

Nach ENOCH & PROVINCE (30) kann sie u. U. willentlich gesteuert werden.

5.6 Fehlerbetrachtung

Eine Unsicherheit lieferte die Tatsache, daß die Helligkeit mit den vorhandenen Graufiltern nicht stufenlos einreguliert werden konnte. So ließ sich der Äquivalenzpunkt (gleiche Leuchtdichte beider eingesetzter Spektralfarben) nur mit einer Fehlerbreite von ca. 5 % festlegen. Auch stand nur eine begrenzte Anzahl Farbfilter zur Verfügung, so daß in der Farbtafel nicht alle Bereiche lückenlos abgedeckt werden konnten.

Schließlich ließ sich mit den zur Verfügung stehenden Graufiltern nicht jedes gewünschte Leuchtdichteverhältnis herstellen. Zur Erzeugung metamerer Farben wäre ein Monochromator, an dem die betreffenden Normspektralwertanteile x und y abgelesen werden können, zweckmäßiger gewesen.

Das IR-Optometer wurde seinerzeit als Unikat gebaut (19) und wies einige Male verschleißbedingte Schäden auf, die alle bis dahin aufgenommenen Daten wertlos machten.

Beim Vergleich der Schwankungsparameter Spektralfarben-Mischfarben (Absch. 4.3.1) wurde der Wert für die durchschnittliche Schwankung bei den beiden zugrundeliegenden Spektralfarben aus 2 Werten ermittelt, während der durchschnittliche Parameterwert für die Mischung aus 12 Einzelwerten bestimmt wurde. Man kann daher beide Mittelwerte der Schwankungen nur unter Vorbehalt miteinander vergleichen.

Da alle Meßdaten nur aus je einer Messung stammen, ist die Gefahr von "Ausreißern", die das Bild verfälschen, relativ hoch. Dafür wurden aber genügend viele Werte aufgenommen.

Einige Kurven aus Versuch I sind deshalb schwer zu interpretieren. Natürlich ist es denkbar, daß in diesen Bereichen eben in Wirklichkeit eine große Streuung in der Akkommodationsentfernung vorliegt. Es wäre problematisch gewesen, die Untersuchungen zur Erhöhung der Validität an der Versuchsperson mehrere Male zu wiederholen. Bei langdauernden optischen Versuchen sollte man die Gefahr der Gewöhnung und des Trainings der Akkommodation nicht unterschätzen.

6. Anhang

Farbgerade Nr. 1
Komponenten: Blau (423 nm) + Dunkelrot (653 nm)

I/I	$\bar{x}$ (dpt)	s (dpt)	s/ $\bar{x}$	Bb. (dpt)	Bb./ $\bar{x}$	Sak./10 s	Sak./10 s· $\bar{x}$
0/100	3,60	0,109	0,0303	0,85	0,236	11	3,06
15/85	2,93	0,131	0,0447	1,0	0,341	16	5,46
20/80	2,22	0,086	0,0387	0,75	0,338	16	7,21
25/75	2,14	0,122	0,0570	0,75	0,350	11	5,14
33/67	2,32	0,119	0,0513	0,95	0,409	10	4,31
40/60	1,74	0,078	0,0448	1,05	0,603	14	8,05
50/50	1,67	0,083	0,0497	0,85	0,509	19	11,38
50/50	1,68	0,116	0,0690	0,9	0,536	14	8,33
60/40	2,18	0,106	0,0486	0,65	0,298	16	7,34
67/33	1,55	0,099	0,0639	1,0	0,645	16	10,32
75/25	1,55	0,140	0,0903	0,95	0,613	15	9,68
80/20	1,76	0,103	0,0585	0,75	0,426	20	11,36
85/15	1,63	0,074	0,0454	0,9	0,552	19	11,66
100/0	1,48	0,058	0,0392	0,65	0,439	10	6,76

Tab. 3a: Akkommodationsmessungen auf Farbgerade Nr. 1

$\bar{x}$: Mittelwert

s: Standardabweichung

Bb.: Bandbreite des Akkommodationsverlaufes

Sak.: Zahl der Sakkaden

I/I: Intensitäts- bzw. Leuchtdichteverhältnis

Farbgerade Nr. 2
Komponenten: Grün (529 nm) + Rot (622 nm)

I/I	$\bar{x}$ (dpt)	s (dpt)	s/ $\bar{x}$	Bb. (dpt)	Bb./ $\bar{x}$	Sak./10 s	Sak./10 s· $\bar{x}$
0/100	3,25	0,115	0,0354	0,8	0,246	18	5,54
15/85	3,17	0,076	0,0240	0,95	0,300	16	5,05
20/80	3,22	0,117	0,0363	0,85	0,264	18	5,59
25/75	3,18	0,125	0,0393	0,7	0,220	15	4,72
33/67	3,02	0,084	0,0278	0,95	0,315	17	5,63
40/60	3,05	0,108	0,0354	0,95	0,311	14	4,59
50/50	2,86	0,106	0,0371	0,85	0,297	16	5,59
50/50	2,81	0,107	0,0381	0,6	0,214	11	3,91
60/40	2,82	0,103	0,0365	0,65	0,230	12	4,26
67/33	2,61	0,099	0,0379	0,45	0,172	12	4,60
75/25	2,72	0,099	0,0364	0,8	0,294	11	4,04
80/20	2,85	0,116	0,0407	0,85	0,299	15	5,26
85/15	2,57	0,177	0,0689	0,9	0,350	12	4,67
100/0	2,66	0,094	0,0353	0,85	0,320	17	6,39

Tab. 3b: Akkommodationsmessungen auf Farbgerade Nr. 2
(Erklärung siehe Tab. 3a)

Farbgerade Nr. 3
Komponenten: Gelb (573 nm) + Rot (653 nm)

I/I	$\bar{x}$ (dpt)	s (dpt)	$s/\bar{x}$	Bb. (dpt)	Bb./ $\bar{x}$	Sak./10 s	Sak./10 $s \cdot \bar{x}$
0/100	3,60	0,108	0,0300	1,0	0,278	19	5,28
15/85	3,16	0,117	0,0370	1,05	0,332	17	5,38
20/80	3,50	0,111	0,0317	0,7	0,200	13	5,14
25/75	3,00	0,107	0,0357	0,95	0,317	13	6,00
33/67	3,20	0,091	0,0284	0,9	0,281	24	7,50
40/60	3,52	0,117	0,0332	0,65	0,185	16	4,55
50/50	2,89	0,075	0,0260	1,2	0,415	16	5,54
50/50	2,78	0,076	0,0273	1,0	0,360	15	5,40
60/40	3,10	0,125	0,0403	0,9	0,290	13	4,19
67/33	2,95	0,118	0,0400	0,9	0,305	15	5,08
75/25	3,13	0,114	0,0364	0,85	0,272	22	7,03
80/20	2,74	0,122	0,0445	1,15	0,420	21	7,66
85/15	2,68	0,180	0,0671	1,05	0,392	15	5,60
100/0	2,99	0,100	0,0334	0,65	0,217	17	5,69

Tab. 3c: Akkommodationsmessungen auf Farbgerade Nr. 3
(Erklärung siehe Tab. 3a)

Farbgerade Nr. 4
Komponenten: Türkis (499 nm) + Gelb (573 nm)

I/I	$\bar{x}$ (dpt)	s (dpt)	$s/\bar{x}$	Bb. (dpt)	Bb./ $\bar{x}$	Sak./10 s	Sak./10 $s \cdot \bar{x}$
0/100	2,99	0,100	0,0334	0,65	0,217	17	5,69
15/85	2,49	0,117	0,0470	0,7	0,281	13	5,22
20/80	2,55	0,085	0,0333	0,9	0,353	14	5,19
25/75	2,74	0,075	0,0274	1,05	0,383	16	5,34
33/67	2,55	0,113	0,0443	0,95	0,373	15	5,38
40/60	2,94	0,105	0,0357	0,65	0,221	12	4,28
50/50	2,70	0,093	0,0344	0,85	0,315	14	5,13
50/50	2,53	0,086	0,0340	0,7	0,277	16	6,32
60/40	2,66	0,093	0,0350	0,85	0,320	18	6,77
67/33	2,44	0,103	0,0422	0,9	0,369	14	5,74
75/25	2,93	0,141	0,0481	1,10	0,375	11	3,75
80/20	2,55	0,077	0,0302	0,6	0,235	13	5,10
85/15	2,33	0,108	0,0464	0,6	0,258	15	6,24
100/0	2,44	0,100	0,0410	0,65	0,266	13	5,33

Tab. 3d: Akkommodationsmessungen auf Farbgerade Nr. 4
(Erklärung siehe Tab. 3a)

Farbgerade Nr. 5
Komponenten: Blau (478 nm) + Rot (653 nm)

I/I	$\bar{x}$ (dpt)	s (dpt)	s/ $\bar{x}$	Bb. (dpt)	Bb./ $\bar{x}$	Sak./10 s	Sak./10 s· $\bar{x}$
0/100	3,60	0,108	0,0300	0,85	0,236	19	5,28
15/85	2,82	0,103	0,0365	0,85	0,301	17	6,03
20/80	2,55	0,078	0,0306	0,85	0,333	21	8,24
25/75	2,40	0,090	0,0375	0,7	0,292	18	7,50
33/67	2,26	0,116	0,0513	0,95	0,420	14	6,19
40/60	2,11	0,075	0,0355	0,9	0,427	15	7,11
50/50	2,14	0,078	0,0364	0,75	0,350	13	6,07
50/50	1,94	0,105	0,0541	0,65	0,335	14	7,22
60/40	2,17	0,075	0,0346	0,85	0,392	13	5,99
67/33	1,83	0,113	0,0617	0,6	0,328	13	7,10
75/25	1,99	0,105	0,0528	0,7	0,352	17	8,54
80/20	2,03	0,142	0,0700	0,75	0,369	17	8,37
85/15	2,23	0,061	0,0274	0,9	0,404	11	4,93
100/0	2,23	0,082	0,0368	0,7	0,314	15	6,73

Tab. 3e: Akkomodationsmessungen auf Farbgerade Nr. 5
(Erklärung siehe Tab. 3a)

Farbgerade Nr. 6
Komponenten: Blau (452 nm) + Grün (554 nm)

I/I	$\bar{x}$ (dpt)	s (dpt)	s/ $\bar{x}$	Bb. (dpt)	Bb./ $\bar{x}$	Sak./10 s	Sak./10 s· $\bar{x}$
0/100	2,72	0,095	0,0349	0,7	0,257	14	5,15
15/85	2,60	0,111	0,0427	0,8	0,308	13	6,32
20/80	2,34	0,127	0,0543	0,7	0,299	16	6,84
25/75	2,68	0,130	0,0485	0,75	0,280	13	4,55
33/67	2,55	0,113	0,0443	1,05	0,412	14	5,49
40/60	2,63	0,127	0,0483	0,75	0,285	17	6,26
50/50	2,65	0,099	0,0374	0,75	0,283	18	6,79
50/50	2,55	0,083	0,0325	0,55	0,216	12	4,71
60/40	2,28	0,115	0,0504	0,65	0,285	21	9,21
67/33	2,35	0,113	0,0481	0,6	0,255	15	6,38
75/25	2,25	0,097	0,0431	0,8	0,355	20	8,89
80/20	2,31	0,070	0,0303	0,75	0,325	22	9,52
85/15	2,49	0,101	0,0406	0,8	0,321	24	9,64
100/0	1,75	0,083	0,0474	0,6	0,343	13	7,43

Tab. 3f: Akkomodationsmessungen auf Farbgerade Nr. 6
(Erklärung siehe Tab. 3a)

Farbgerade Nr. 7
Komponenten: Blau (478 nm) + Gelb (573 nm)

I/I	$\bar{x}$ (dpt)	s (dpt)	s/ $\bar{x}$	Bb. (dpt)	Bb./ $\bar{x}$	Sek./10 s	Sek./10 s $\cdot \bar{x}$
0/100	2,99	0,100	0,0334	0,65	0,217	17	5,69
15/85	2,65	0,101	0,0381	0,65	0,245	21	7,92
20/80	2,69	0,097	0,0361	0,75	0,279	22	8,18
25/75	3,34	0,117	0,0350	0,8	0,240	22	6,59
33/67	2,18	0,072	0,0330	0,6	0,275	20	9,17
40/60	2,59	0,088	0,0340	0,75	0,290	16	6,18
50/50	2,23	0,099	0,0444	1,0	0,448	19	8,52
50/50	2,91	0,097	0,0333	0,6	0,206	13	4,47
60/40	2,24	0,088	0,0393	0,7	0,313	23	10,27
67/33	2,01	0,101	0,0502	0,85	0,423	19	9,45
75/25	2,91	0,117	0,0402	0,8	0,275	22	7,56
80/20	2,53	0,103	0,0407	0,65	0,257	22	8,70
85/15	2,57	0,099	0,0385	0,65	0,253	22	8,56
100/0	2,23	0,082	0,0368	0,7	0,314	15	6,73

Tab. 3g: Akkomodationsmessungen auf Farbgerade Nr. 7
(Erklärung siehe Tab. 3a)

Farbgerade Nr. 8
Komponenten: Blau (478 nm) + Orange (598 nm)

I/I	$\bar{x}$ (dpt)	s (dpt)	s/ $\bar{x}$	Bb. (dpt)	Bb./ $\bar{x}$	Sek./10 s	Sek./10 s $\cdot \bar{x}$
0/100	3,32	0,109	0,0328	0,85	0,256	16	4,82
15/85	2,78	0,117	0,0421	0,75	0,270	14	5,04
20/80	2,73	0,133	0,0487	0,65	0,238	16	5,86
25/75	2,84	0,095	0,0335	0,7	0,246	14	4,93
33/67	2,67	0,097	0,0363	0,8	0,300	16	5,99
40/60	2,38	0,091	0,0382	0,75	0,315	17	7,14
50/50	2,22	0,106	0,0477	0,85	0,383	20	9,01
60/40	2,34	0,099	0,0423	0,5	0,214	17	7,26
67/33	2,85	0,118	0,0414	0,8	0,281	15	5,26
75/25	2,20	0,093	0,0423	0,65	0,295	19	8,64
80/20	2,23	0,086	0,0386	0,55	0,247	15	6,13
85/15	2,01	0,102	0,0507	0,75	0,373	16	7,96
100/0	2,23	0,082	0,0368	0,6	0,269	12	5,38

Tab. 3h: Akkomodationsmessungen auf Farbgerade Nr. 8
(Erklärung siehe Tab. 3a)

Farbgerade Nr. 9
Komponenten: Blau (478 nm) + Grün (529 nm)

I/I	$\bar{x}$ (dpt)	s (dpt)	$s/\bar{x}$	Bb. (dpt)	$Bb./\bar{x}$	Sak./10 s	Sak./10 $s \cdot \bar{x}$
0/100	2,66	0,094	0,0353	0,9	0,338	13	4,59
15/85	2,31	0,085	0,0368	0,65	0,281	14	6,06
20/80	2,33	0,102	0,0438	0,6	0,258	14	6,01
25/75	2,35	0,080	0,0340	0,5	0,213	15	6,38
33/67	2,58	0,092	0,0357	0,8	0,310	15	5,91
40/60	2,38	0,076	0,0319	0,55	0,231	16	6,72
50/50	2,22	0,104	0,0468	0,7	0,315	20	9,01
60/40	2,22	0,086	0,0387	0,65	0,283	12	5,41
67/33	2,22	0,109	0,0491	0,95	0,428	12	5,41
75/25	2,24	0,085	0,0379	0,7	0,313	19	8,48
80/20	2,15	0,088	0,0409	0,75	0,349	18	8,37
85/15	2,22	0,098	0,0441	0,55	0,248	12	5,41
100/0	2,23	0,082	0,0368	0,65	0,291	14	6,28

Tab. 3i: Akkommodationsmessungen auf Farbgerade Nr. 9
(Erklärung siehe Tab. 3a)

Farbgerade Nr. 10
Komponenten: Blau (478 nm) + Türkis (499 nm)

I/I	$\bar{x}$ (dpt)	s (dpt)	$s/\bar{x}$	Bb. (dpt)	$Bb./\bar{x}$	Sak./10 s	Sak./10 $s \cdot \bar{x}$
0/100	2,44	0,100	0,0410	0,6	0,246	15	6,15
15/85	2,39	0,095	0,0397	0,6	0,251	16	6,69
20/80	2,11	0,105	0,0498	0,6	0,284	18	3,53
25/75	2,16	0,108	0,0500	0,5	0,231	16	7,41
33/67	2,14	0,088	0,0411	0,65	0,304	19	3,38
40/60	2,33	0,078	0,0335	0,5	0,215	15	6,44
50/50	2,56	0,088	0,0344	0,7	0,273	17	6,64
60/40	2,11	0,090	0,0427	1,0	0,474	18	3,53
67/33	1,94	0,102	0,0526	0,75	0,387	14	7,22
75/25	1,90	0,094	0,0495	1,0	0,526	13	6,31
80/20	1,92	0,093	0,0484	0,55	0,286	12	6,25
85/15	2,06	0,091	0,0442	0,6	0,291	17	8,25
100/0	2,23	0,082	0,0368	0,75	0,336	12	5,38

Tab. 3k: Akkommodationsmessungen auf Farbgerade Nr. 10
(Erklärung siehe Tab. 3a)

Farbgerade Nr. 11
Komponenten: Türkis (499 nm) + Rot (653 nm)

I/I	$\bar{x}$ (dpt)	s (dpt)	s/ $\bar{x}$	Eb. (dpt)	Eb./ $\bar{x}$	Sak./10 s	Sak./10 s· $\bar{x}$
0/100	3,60	0,108	0,0300	0,85	0,236	19	5,28
15/85	3,13	0,107	0,0342	0,9	0,288	26	8,31
20/80	3,35	0,115	0,0343	0,85	0,254	26	7,76
25/75	2,88	0,098	0,0340	0,7	0,243	21	7,29
33/67	2,83	0,092	0,0325	0,65	0,230	18	6,36
40/60	2,34	0,082	0,0350	0,8	0,342	25	10,68
50/50	1,90	0,066	0,0347	0,7	0,368	19	10,00
50/50	2,92	0,099	0,0339	0,6	0,205	20	6,85
60/40	2,75	0,085	0,0309	0,85	0,309	23	8,36
67/33	2,69	0,090	0,0334	0,75	0,279	29	10,78
75/25	2,56	0,089	0,0348	0,65	0,254	25	9,77
80/20	2,72	0,085	0,0313	0,85	0,313	22	8,09
85/15	2,34	0,084	0,0359	0,7	0,299	28	11,97
100/0	2,44	0,100	0,0410	0,65	0,266	13	5,33

Tab. 31: Akkommodationsmessungen auf Farbgerade Nr. 11
(Erklärung siehe Tab. 3a)

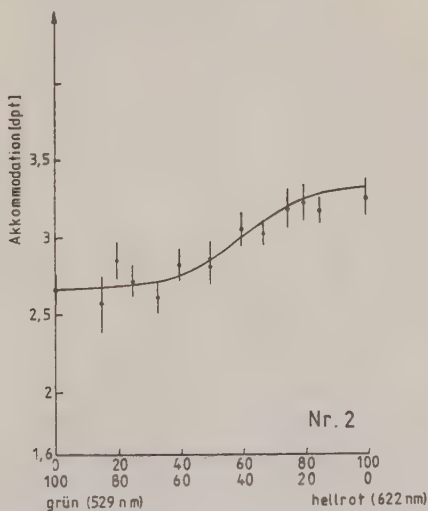
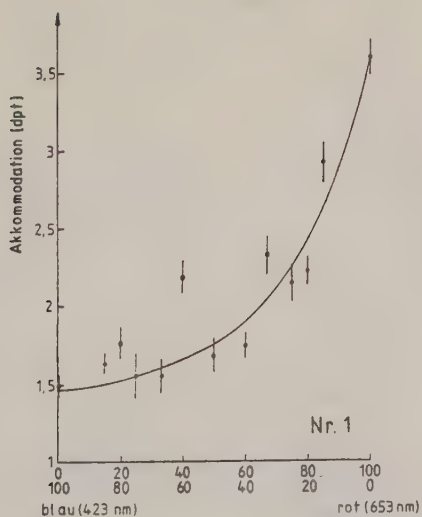


Abb. 13a: Darstellung des Akkommodationsverlaufes, Farbgerade Nr. 1

Abb. 13b: Darstellung des Akkommodationsverlaufes, Farbgerade Nr. 2
(Erklärung siehe Abb. 13a)

Benennung der Abszisse: relatives Leuchtdichteverhältnis

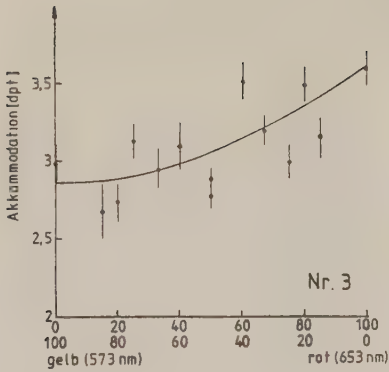


Abb. 13c: Darstellung des Akkommodationsverlaufes, Farbgerade Nr. 3
(Erklärung siehe Abb. 13a)

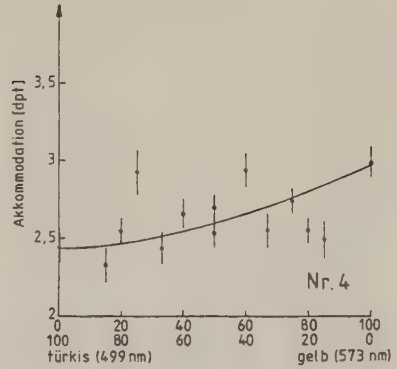


Abb. 13d: Darstellung des Akkommodationsverlaufes, Farbgerade Nr. 4
(Erklärung siehe Abb. 13a)

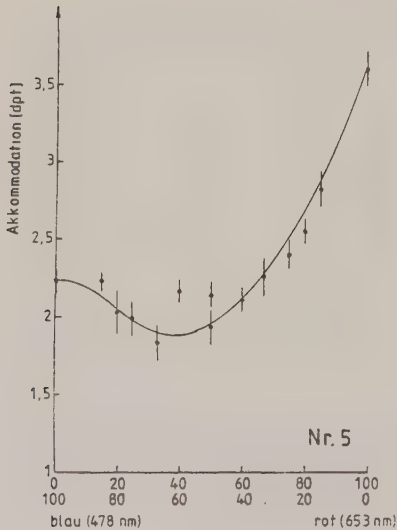


Abb. 13e: Darstellung des Akkommodationsverlaufes, Farbgerade Nr. 5
(Erklärung siehe Abb. 13a)

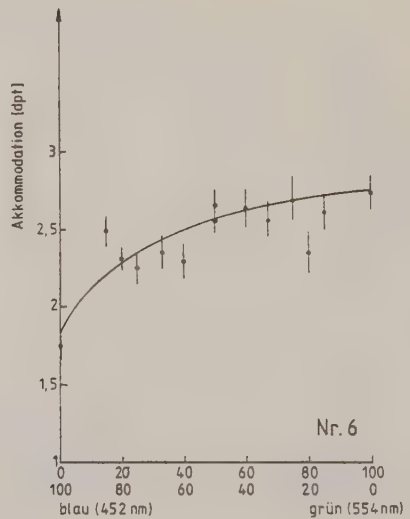


Abb. 13f: Darstellung des Akkommodationsverlaufes, Farbgerade Nr. 6
(Erklärung siehe Abb. 13a)

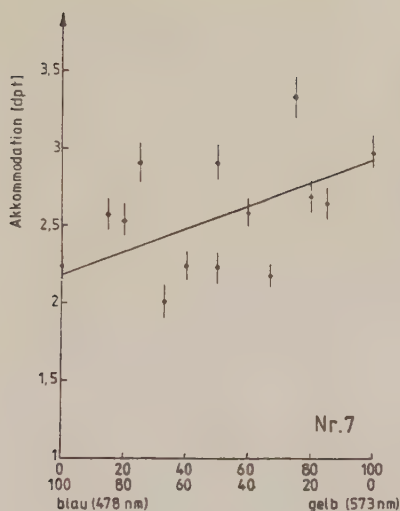


Abb. 13g: Darstellung des Akkommodationsverlaufes, Farbgerade Nr. 7
(Erklärung siehe Abb. 13a)

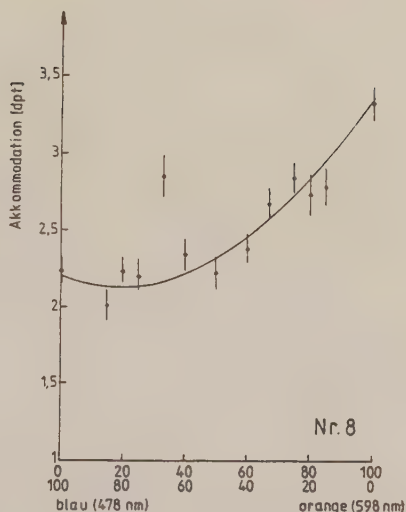


Abb. 13h: Darstellung des Akkommodationsverlaufes, Farbgerade Nr. 8
(Erklärung siehe Abb. 13a)

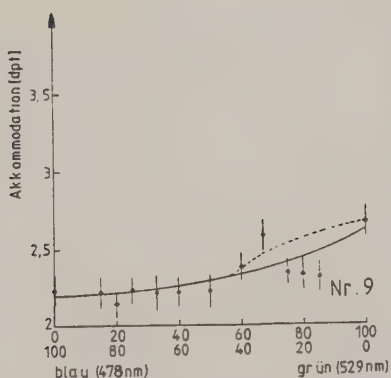


Abb. 13i: Darstellung des Akkommodationsverlaufes, Farbgerade Nr. 9
(Erklärung siehe Abb. 13a)

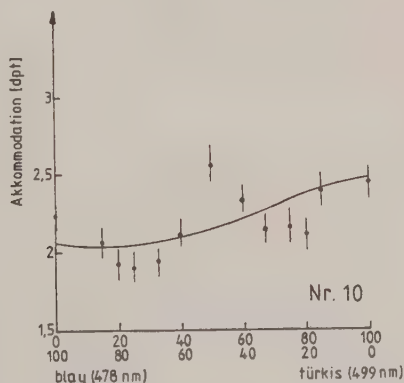


Abb. 13k: Darstellung des Akkommodationsverlaufes, Farbgerade Nr. 10
(Erklärung siehe Abb. 13a)

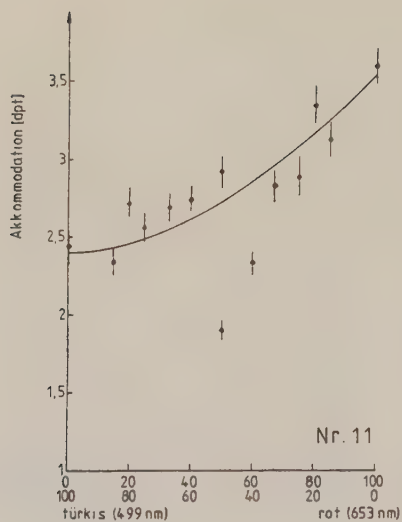


Abb. 131: Darstellung des Akkommodationsverlaufes, Farbgerade Nr. 11
(Erklärung siehe Abb. 13a)

7. Literaturverzeichnis

- (1) ARNULF, A., DUPUY, O., FLAMANT, F.
Les microfluctuations d'accommodation de l'oeil
Annls Opt. Ocul. 3 (1955), 109 - 118
- (2) BEDFORD, R. E., WYSZECKI, G.
Axial Chromatic Aberration of the Human Eye
J. Opt. Soc. Amer. 47 (1957), 564 - 565
- (3) BRESSON, Y., MARTHY, D.
Vision des couleurs I. Nouvelle théorie trichromatique
de la vision normale des couleurs
J. Fr. Biophys. Med. Nucl. 3 (1979), 99 - 109
- (4) CAMPBELL, F. W.
The Accommodation Response of the Human Eye
Brit. J. Physiol. Optics 16 (1959), 188 - 203
- (5) CAMPBELL, F. W.
Correlation of Accommodation between the Two Eyes
J. Opt. Soc. Amer. 50 (1960), 738
- (6) CAMPBELL, F. W., ROBSON, J. G., WESTHEIMER, G.
Fluctuations of Accommodation under Steady Viewing
Conditions
J. Physiol. 145 (1959), 579 - 594
- (7) CAMPBELL, F. W., WESTHEIMER, G., ROBSON, J. G.
Significance of Fluctuations of Accommodation
J. Opt. Soc. Amer. 48 (1958), 669
- (8) CHARMAN, W. N., JENNINGS, J. A. M.
Objective Measurements of the Longitudinal Chromatic
Aberration of the Human Eye
Vision Res. 16 (1976), 999 - 1005
- (9) CORNSWEET, T. N., CRANE, H. D.
Training the Visual Accommodation System
Vision Res. 13 (1973), 713 - 715

- (10) FINCHAM, E. F.
Defects of the Colour Sense Mechanism as Indicated by the Accommodation Reflex
J. Physiol. 121 (1953), 570 - 580
- (11) FINCHAM, E. F., WALTON, G.
The Reciprocal Actions of Accommodation and Convergence
J. Physiol. 137 (1957), 488 - 508
- (12) FRICK, H., LEONHARDT, H., STARCK, D.
Spezielle Anatomie II
Stuttgart 1978
- (13) GANONG, W. F.
Medizinische Physiologie
Berlin, Heidelberg und New York 1979
- (14) HESSEN, J.
Subjektive und objektive Messungen zum programmierten Ablauf von Akkommodation und Vergenz
Diss. Univ. München 1982
- (15) IVANOFF, A.
Chromatic Aberration of the Eye
Doc. Ophthalm. 3 (1949), 322 - 323
- (16) KAHLE, W.
Nervensystem und Sinnesorgane
Stuttgart 1978
- (17) KNOLL, A.
Measuring Ametropia with a Gas Laser
Am. J. Optom. & Archs Am. Acad. Optom. 43 (1966), 415 - 418
- (18) KRUEGER, H.
Untersuchung zum Konvergenz-Akkommodations-Pupillen-Regelkreis des menschlichen Auges mit einem kontinuierlich aufzeichnenden Pupillo- und Akkommodometer
Diss. Univ. München 1968

- (19) KRUEGER, H.
An Apparatus for Continuous, Objective Measurement of Refraction of the Human eye
Opt. Acta 20 (1973), 277 - 285
- (20) KRUEGER, H.
Schwankungen der Akkommodation des menschlichen Auges bei mon- und binokularer Betrachtung
Albrecht v. Graefe's Arch. Klin. Exp. Ophthalm. 205 (1978), 129 - 133
- (21) KRUEGER, H., HESSEN, J.
Objektive, kontinuierliche Messung der Refraktion des Auges
Biomed. Technik 27 (1982), 142 - 147
- (22) KRUEGER, H., HESSEN, J., ZÜLCH, J.
Bedeutung der Akkommodation für das Sehen am Arbeitsplatz
Vortrag Gesellschaft für Arbeitswissenschaft Zürich 1981
- (23) KRUEGER, H., MADER, R.
Der Einfluß der Farbsättigung auf den chromatischen Fehler der Akkommodation des menschlichen Auges
Fortschr. Ophthalm. 79 (1982), 171 - 173
- (24) LEIBOWITZ, H. W., OWENS, D. A.
Night Myopia and the Intermediate Dark Focus of Accommodation
J. Opt. Soc. Amer. 65 (1975), 1121 - 1128
- (25) MILLODOT, M.
Effet des microfluctuations de l'accommodation sur l'acuité visuelle
Vision Res. 8 (1968), 73 - 80
- (26) MILLODOT, M.
The Influence of Age on the Chromatic Aberration of the Eye
Albrecht v. Graefe's Arch. Klin. Exp. Ophthalm. 198 (1976), 235 - 243

- (27) MILLODOT, M., BOBIER, C.
The State of Accommodation during the Measurement of Axial Chromatic Aberration of the Eye
Am. J. Optom. & Physiol. Optics 53 (1976),
168 - 172
- (28) MILLODOT, M., RONCHI, L.
The Sharpness of Monochromatic Targets: A Paradox
Atti della Fond. G. Ronchi 28 (1973), 964 - 969
- (29) MILLODOT, M., SIVAK, J.
Influence of Accommodation on the Chromatic Aberration of the Eye
Brit. J. Physiol. Optics 28 (1973), 169 - 174
- (30) PROVIN, R. R., ENOCH, J. M.
On Voluntary Ocular Accommodation
Perception & Psychophys. 17 (1975), 209 - 212
- (31) RICHTER, M.
Einführung in die Farbmeterik
Berlin 1981
- (32) RONCHI, L., MILLODOT, M.
The Cortical Counterpart of the Chromatic Aberration of the Eye
Am. J. Optom. & Physiol. Optics 51 (1974), 635 - 641
- (33) SCHÖBER, H.
Das Sehen, Band 1 u. 2
Leipzig 1960 u. 1964
- (34) TOATES, F. M.
Accommodation Function of the Human Eye
Physiol. Reviews 52 (1972), 828 - 863
- (35) TRACHTMAN, J. N.
Biofeedback of Accommodation to Reduce Functional Myopia: A Case Report
Am. J. Optom. & Physiol. Optics 55 (1978), 400 - 406

Danksagung

Dem Leiter des Instituts für Arbeitsphysiologie, Herrn o. Prof. Dr. med. W. Müller-Limmroth, möchte ich danken für die freundliche Überlassung des Themas der Dissertationsarbeit sowie des Arbeitsplatzes.

Ganz besonderen Dank schulde ich dem Betreuer der Arbeit, Herrn Prof. Dr. med. Dr. rer. nat. H. Krueger, für seine bereitwillige Hilfe bei der Durchführung der Experimente sowie für seine wertvollen Anregungen und Verbesserungsvorschläge bei der Abfassung des Manuskripts.

Ferner möchte ich mich an dieser Stelle bei der Probandin, Frau Dr. med. Marianne Krafft, für ihre Geduld und Mitarbeit recht herzlich bedanken.

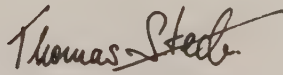
Schließlich gilt mein Dank allen übrigen Mitarbeitern des Instituts für Arbeitsphysiologie, insbesondere Herrn Dipl.-Ing. J. Zülch und Herrn Dr. rer. nat. J. Hessen, die bei auftauchenden Schwierigkeiten stets zu konstruktiver Zusammenarbeit bereit waren.

Ehrenwörtliche Erklärung

Ich erkläre hiermit ehrenwörtlich, daß ich die vorliegende Arbeit selbständig angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit wurde bisher keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

München, im November 1985

A handwritten signature in black ink, reading "Thomas Steck". The signature is written in a cursive style with a long horizontal stroke extending from the end of the name.

(Thomas Steck)

Lebenslauf

14.07.59 geboren als erstes Kind des Bankkaufmanns
Alfred Steck und seiner Frau Rosemarie

1965 - 1969 Grundschule in Freising

1969 - 1978 Neusprachliches Gymnasium in Freising

Juni 1978 Abiturprüfung

13.09.79 Immatrikulation an der Universität München
im Fach Medizin

August 1981 Ärztliche Vorprüfung

August 1982 1. Abschnitt der Ärztlichen Prüfung

August 1984 2. Abschnitt der Ärztlichen Prüfung

Oktober 1985 3. Abschnitt der Ärztlichen Prüfung

13.11.85 Approbation als Arzt

